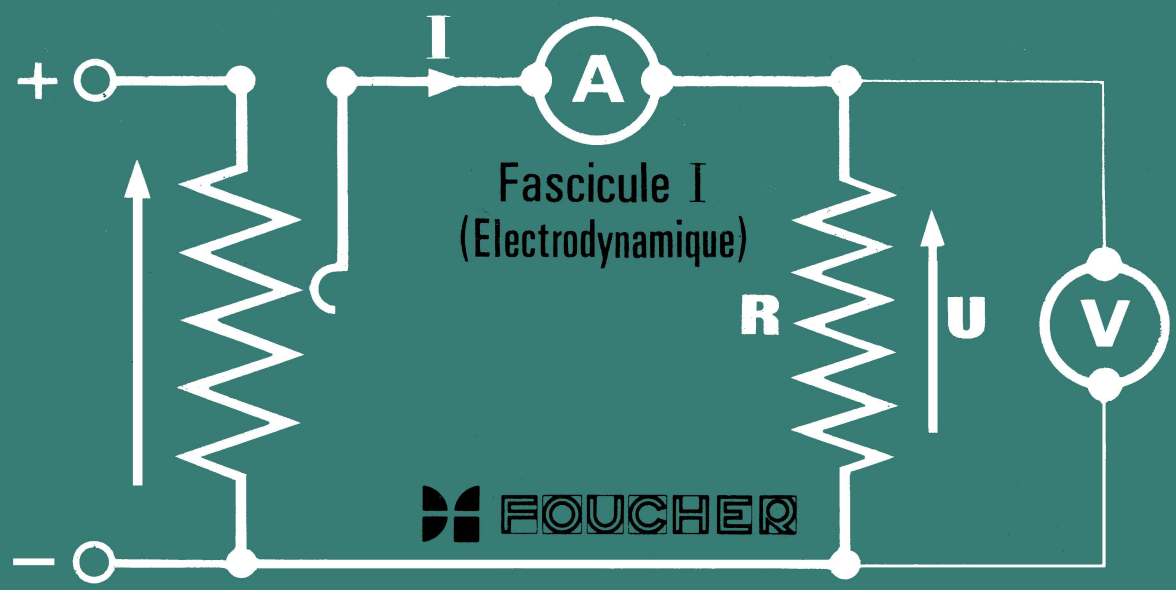
G. THOMASSET

COLLECTION MOUNIC

# ELECTRICITE

## COURANT CONTINU

Lycées, C.E.S, C.E.T




Fascicule I
(Electrodynamique)

FOUCHER

**G. THOMASSET**

Professeur au Lycée technique d'État
et au Collège d'Enseignement technique de Puteaux

# ÉLECTRICITÉ

## COURANT CONTINU

### FASCICULE I

### Electrodynamique

*Du débutant au bachelier*

LES ÉDITIONS FOUCHER
128, rue de Rivoli, Paris

# Électronique

## (Collection MOUNIC)

| | | |
|---|---|---|
| *Semiconducteurs.* 1re Partie | | **MOUNIC** |
| *Semiconducteurs.* 2e Partie : *Transistors* | | — |
| *Semiconducteurs.* 3e Partie : *Thyristors, triacs* | | — |
| *Transistors - Problèmes avec solutions (3 fascicules)* | | — |
| *Redressement (2 fascicules)* | | — |
| *Travaux pratiques d'électronique (3 fascicules)* | par et | **MOUNIC RICARD** |
| *Travaux pratiques d'électronique*, fascicule 4 | par et | **MOUNIC RICARD MONFORT** |
| *Impulsions* | par | **P. RIVÈRE** |
| *Télévision (2 fascicules)* | par | **PARDIES** |
| *Servomécanismes (Cours)* | par | **PEUTEMAN** |
| *Travaux pratiques de servomécanismes* | par et | **MONTEILLER PEUTEMAN** |
| *Éléments de théorie de l'Information* | par | **J.-P. RIVÈRE** |
| *Les calculateurs numériques* | | — |
| *Électricité.* | | |
| Fascicule 1 : *Courant continu. Électrodynamique* | par | **THOMASSET** |
| Fascicule 2 : *Magnétisme. Électromagnétisme. Machines à courant continu* | | — |
| Fascicule 3 : *Courant alternatif. Lois générales. Condensateur. Inductance* | par et | **MOUNIC THOMASSET** |
| Fascicule 4 : *Courants triphasés. Machines à courant alternatif. Électronique* | | — |
| *Manipulations d'électricité (2 fascicules)* | par et | **MONFORT RICARD** |

**FOUCHER** - Éditeur

Toute représentation, traduction, adaptation ou reproduction, même partielle, par tous procédés, en tous pays, faite sans autorisation préalable, est illicite et exposerait le contrevenant à des poursuites judiciaires. (Réf. Loi du 11 mars 1957).
© Les Éditions FOUCHER, Paris, 1969.

# TABLE DES MATIÈRES


**I. — GRANDEURS MÉCANIQUES**

A - Notion de force ..... 5
B - Travail et puissance ..... 11
C - Tableau récapitulatif ..... 14
D - Exercices résolus ..... 14
*Problèmes* ..... 15

**II. — ÉNERGIE**

A - Définition ; unités ..... 17
B - Formes de l'énergie ..... 17
C - Rendement ..... 22
D - Exercices résolus ..... 22
*Problèmes* ..... 24

**III. — NOTIONS D'ÉLECTROSTATIQUE**

A - Électrisation des substances ..... 27
B - Nature de l'électricité ..... 29
C - Corps conducteurs ; corps isolants ..... 31
*Problème* ..... 32
*Lecture : Applications industrielles de l'électrostatique* ..... 32

**IV. — COURANT ÉLECTRIQUE**

A - Manifestations d'un courant ..... 33
B - Nature du courant ..... 37
C - Sens du courant ..... 39
D - Production du courant continu ..... 40
*Problèmes* ..... 41
*Lecture : Centrales électriques* ..... 41

**V. — INTENSITÉ D'UN COURANT**

A - Quantité d'électricité ..... 43
B - Intensité ; définition ; mesure ..... 45
C - Propriétés de l'intensité ..... 47
D - L'ampère-heure ..... 48
E - Exercices résolus ..... 49
*Problèmes* ..... 50

**VI. — LOI DE JOULE. RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE**

A - Observations ..... 51
B - Mesures ..... 52
C - Autres expressions de la loi de Joule ..... 56
D - Conséquences pratiques de l'effet Joule ..... 57
E - Exercices résolus ..... 61
*Problèmes* ..... 62

**VII. — TENSION ÉLECTRIQUE (ou différence de potentiel)**

A - Définitions ..... 65
B - Énergie et puissance électriques ..... 67
C - Groupements des récepteurs ..... 69
D - Notion de potentiel ..... 71
E - Mesures de la puissance ..... 73
F - Exercices résolus ..... 76
*Problèmes* ..... 77

**VIII. — LOI D'OHM RELATIVE A UNE RÉSISTANCE**

A - Démonstration à partir de la loi de Joule ..... 79
B - Expérience de vérification ..... 81
C - Expressions de la puissance dissipée dans une résistance ..... 81
D - Applications de la loi d'Ohm : mesure d'une résistance, etc. ..... 82
E - Exercices résolus ..... 84
*Problèmes* ..... 85

**IX. — EXPRESSION D'UNE RÉSISTANCE. RÉSISTIVITÉ**

A - Expériences ..... 87
B - Expression de la résistance ; résistivité ..... 89
C - Applications ..... 93
D - Exercices résolus ..... 94
*Problèmes* ..... 95

**X. — GROUPEMENT DES RÉSISTANCES**

A - Groupement ; résistance équivalente ..... 97
B - Groupement en série ..... 98
C - Groupement en parallèle ..... 99
D - Groupement mixte ..... 101
E - Applications du groupement des résistances ..... 102
F - Exercices résolus ..... 107
*Problèmes* ..... 108

**XI. — PROPRIÉTÉS DES GÉNÉRATEURS ; GROUPEMENT**

A - Types de générateurs ..... 112
B - Force électromotrice ; résistance interne ..... 112
C - Loi d'Ohm relative à un générateur ..... 114
D - Rendement d'un générateur ..... 116
E - Groupement des générateurs ..... 116
F - Exercices résolus ..... 119
*Problèmes* ..... 121

**XII. — RÉCEPTEURS A FORCE CONTRE-ÉLECTROMOTRICE**

A - Définitions ..... 125
B - Caractéristiques ..... 126
C - Lois d'Ohm ..... 128
D - Rendement d'un récepteur ..... 130
E - Groupement des récepteurs ..... 130
F - Exercices résolus ..... 131
*Problèmes* ..... 132

**XIII. — ÉLECTROLYSE**

A - Étude qualitative ..... 135
B - Étude quantitative ..... 140
C - Applications industrielles ..... 144
D - Exercices résolus ..... 144
*Problèmes* ..... 145

**XIV. — GÉNÉRATEURS CHIMIQUES**

A - Piles ..... 147
B - Accumulateurs ..... 150
C - Accumulateurs au plomb ; réalisation industrielle ..... 153
D - Accumulateurs alcalins ..... 156
E - Exercices résolus ..... 156
*Problèmes* ..... 157
*Lecture technique : Autres types de générateurs à courant continu* ..... 159

# I. — GRANDEURS MÉCANIQUES

**MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL :**

— deux chemins de roulement profil U étiré de 30 × 33 et 2 m de long ;
— bille d'acier ø 40 mm ;
— chronomètre de précision
— plan incliné ;
— fil à plomb ;
— poulie ;
— dynamomètre
— ressort.

## A. — Notion de force

Nous rappelons dans ce premier chapitre quelques définitions et relations de mécanique, utilisées en électricité.

### 1. — ACCÉLÉRATION

Dans le langage ordinaire, ***accélérer*** signifie *aller de plus en plus vite ;* par exemple un véhicule fournit une grande accélération lorsque, en un temps très court, il change de régime pour passer à une vitesse supérieure.

D'une façon plus précise, un mobile M (fig. 1) dont la vitesse $v_1 = 10$ mètres par seconde à l'instant $t_1 = 4$ secondes devient $v_2 = 20$ mètres par seconde à l'instant $t_2 = 6$ secondes, a un accroissement de vitesse :

$$v_2 - v_1 = 20 - 10 = 10 \text{ mètres par seconde (m/s)}$$

et une accélération $\gamma$ (*gamma*) :

$$\gamma = \frac{10}{6-4} = 5 \text{ mètres par seconde par seconde (m/s}^2\text{)}$$

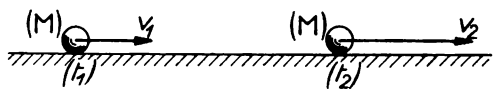



FIG. 1.

L'accélération est donc telle que :

$$\gamma = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} \quad \begin{cases} \gamma \text{ en m/s}^2. \\ v_1,\ v_2 \text{ en m/s}. \\ t_1,\ t_2 \text{ en s}. \end{cases}$$

De même une bille B, lâchée sans vitesse initiale sur un plan incliné, acquiert une vitesse que l'on mesure par la distance parcourue, en 1 seconde, sur le plan horizontal (fig. 2).

On constate que la vitesse est proportionnelle au temps de chute entre les points N et O ; par exemple, pour une certaine inclinaison du plan :

après 1 seconde de chute : $v_1 = 0{,}5$ m/s.
— 2 — — : $v_2 = 1$ m/s.
— 3 — — : $v_3 = 1{,}5$ m/s.

$v$ augmente donc pendant 1 seconde de la même quantité 0,5 m/s ; cet accroissement de vitesse par seconde est appelé **accélération du mouvement.**

Dans l'exemple précédent, l'accélération est constante : ce mouvement est dit **« uniformément accéléré ».**

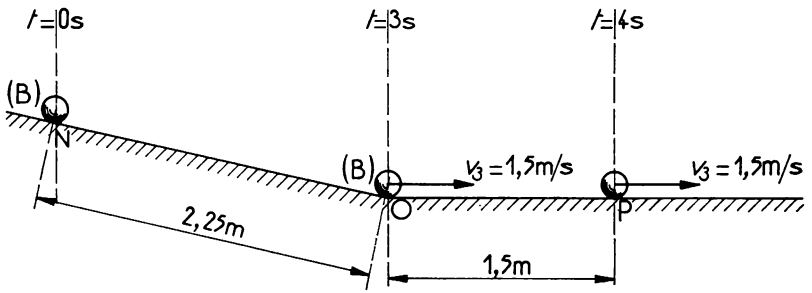



FIG. 2. — *Exemple :* mesure de $v_3$. Pour NO = 2,25 mètres en 3 secondes : OP = 1,5 mètre en 1 seconde.

## 2. — FORCE

*a)* **On appelle *force* toute cause physique capable de modifier les conditions de mouvement ou de repos d'un corps ou d'y produire une déformation.**

Lorsqu'un homme fournit un effort pour déplacer un objet ou mettre un corps en mouvement, il exerce une force sur ce corps ; si le vent fait avancer un voilier, il exerce une poussée, c'est-à-dire une force, sur la voile ; une voiture, soumise à la force de traction de son moteur, démarre et prend un mouvement accéléré : ce sont des forces dites **forces motrices.**

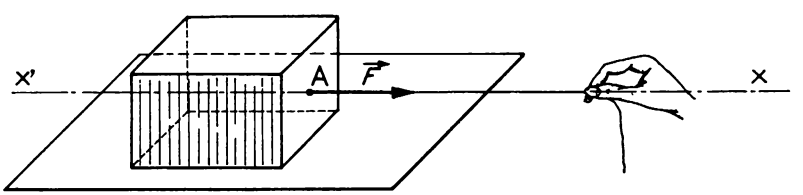



FIG. 3. — X'X : support ou ligne d'action de la force $\vec{F}$ ; A : point d'application.

Inversement un frein arrêtant le mouvement d'une voiture développe une force dite **force résistante;** à la diminution de vitesse correspond une accélération négative (ou décélération).

En résumé, toute force communique une accélération au corps mobile sur lequel elle agit.

*b*) **Une force est caractérisée par une direction, un sens, une intensité.**

On la symbolise par un segment de droite orienté ou ***vecteur*** ($\vec{F}$) (fig. 3) ; ce vecteur :

— est porté par une droite X'X qui est le support ou ligne d'action de la force ; sa direction est matérialisée par le fil tendu ;

— a pour sens celui du mouvement que la force produit ou tend à produire ;

— est proportionnelle à l'intensité — ou module — de la force, mesurée par un dynamomètre (fig. 4).

*c*) **L'unité S. I. (Système International) de force est le *newton* (N) (1)** (fig. 5). Le kilogramme-force (kgf) est déconseillé.

$$1 \text{ kgf} = 9{,}81 \text{ N} \approx 1 \text{ daN}.$$

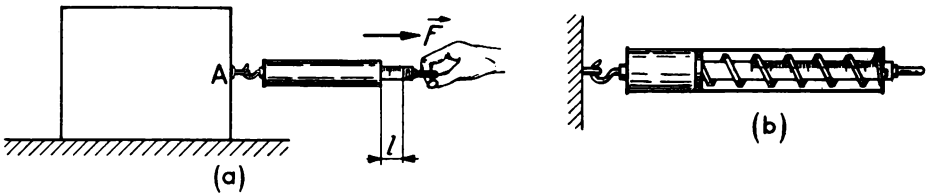



FIG. 4 — *a*) L'intensité de la force est mesurée par la longueur de la déformation *l* du ressort étalonné du dynamomètre. *b*) Dynamomètre : vue intérieure.

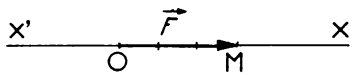



FIG. 5. — La force $\vec{F}$ représentée a une intensité ou module : OM = 3 newtons (N).

## 3. — POIDS

*a*) **Le *poids* d'un corps est une *force*:** c'est la force d'attraction que la Terre exerce sur lui ou ***pesanteur***. Suspendons un corps (fig. 6) : le fil, tendu par le poids $\vec{P}$ du corps, matérialise, par définition, la direction de la verticale (en ce lieu). Si l'on coupe le fil, le corps tombe librement sous l'action de son propre poids et son mouvement de chute est accéléré.

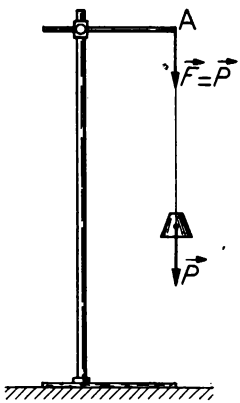



FIG. 6.

(1) Nous donnerons la définition complète du newton (prononcez *nioutonne*) au § 6.

*b*) **Le poids P d'un corps varie avec le lieu et l'altitude.**

Cette variation reste faible ; le poids augmente d'environ 5/1 000 de l'Équateur au Pôle et diminue pour un même lieu de 3/10 000 de l'altitude zéro à l'altitude mille mètres.

Mais la diminution du poids $P$ d'un corps devient très importante à de grandes distances autour de la Terre ; elle est de l'ordre de $P/10$ pour les satellites artificiels et engins spatiaux gravitant en moyenne à une altitude de 300 kilomètres.

(Sur la Lune, le « poids » d'un corps est six fois plus petit que sur la Terre.)

## 4. — MASSE

*a*) **La *masse m* d'un corps est la *quantité de matière* qui constitue ce corps.**

A la différence du poids, la masse d'un corps est une constante qui caractérise ce corps ; elle est indépendante du lieu.

Ainsi lorsque vous achetez un sac de charbon, c'est sa masse qui vous intéresse, c'est-à-dire la quantité de charbon qui, en brûlant, dégagera la chaleur ; mais c'est le poids de ce charbon qui nécessite un effort musculaire pour le transporter (fig. 7).

*b*) **L'unité S. I. de masse est le kilogramme (kg).**

C'est la masse du prototype en platine iridié, déposé au pavillon de Breteuil, à Sèvres.

## 5. — RELATION FONDAMENTALE ENTRE FORCE, MASSE ET ACCÉLÉRATION

La matière est caractérisée par son inertie : plus un corps contient de matière, c'est-à-dire plus sa masse est grande, plus il est difficile de le mettre en mouvement, de lui communiquer une accélération.

Lorsque diverses forces $F_1$, $F_2$, ... accélèrent successivement un même corps de masse $m$, on trouve que les accélérations $\gamma_1$, $\gamma_2$, ... correspondantes sont telles que :

$$\frac{F_1}{\gamma_1} = \frac{F_2}{\gamma_2} = \ldots = m.$$

Ce qui se traduit par la relation fondamentale de la dynamique : $\vec{F} = m\vec{\gamma}$ et en module :

$$\boxed{F = m\gamma} \quad (1) \quad \begin{cases} F \text{ en newton (N)} \\ m \text{ en kilogramme (kg)} \\ \gamma \text{ en mètre par seconde par seconde (m/s}^2\text{)}. \end{cases}$$

Dans le cas particulier d'un corps de masse $m$, en chute libre sous l'action de son propre poids, cette relation s'écrit : $\vec{P} = m\vec{g}$, et en module :

$$\boxed{P = mg} \quad (2) \quad (\text{N, kg, m/s}^2)$$

dans laquelle $g$ est l'accélération de la pesanteur; à la surface de la Terre, $g \approx 9{,}8$ m /s$^2$ ($g = 9{,}81$ m /s$^2$ à Paris). Comme le poids $\vec{P}$, l'accélération de la pesanteur est dirigée suivant la verticale, vers le bas (fig. 8).

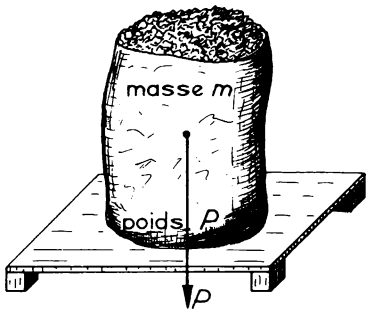



FIG. 7.

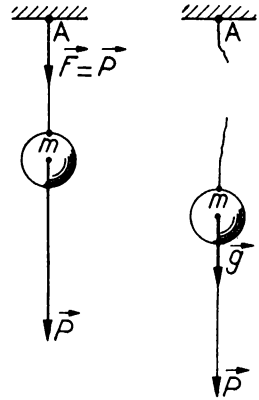



FIG. 8.

REMARQUE. — En application de la relation (1), remarquons qu'un homme exerçant la même force $F$ sur un chariot vide (masse $m_1$) puis chargé (masse $m_2$) lui communique des accélérations $\gamma_1$ et $\gamma_2 < \gamma_1$ telles que

$$F = m_1 \gamma_1 = m_2 \gamma_2.$$

L'accélération produite par une force est inversement proportionnelle à la masse sur laquelle cette force s'exerce.

## 6. — DÉFINITION DU NEWTON (1)

Pour $m = 1$ kg et $\gamma = 1$ m/s², la relation $F = m\gamma$ donne $F = 1$ unité de force ; cette unité est appelée le ***newton***.

**Le newton est la force qui communique à une masse de 1 kilogramme une accélération de 1 mètre par seconde par seconde.**

## 7. — MOMENT D'UNE FORCE ; MOMENT D'UN COUPLE

Soit une force $F$ s'exerçant sur un organe mobile autour d'un axe ; c'est le cas, par exemple, d'une poulie entraînée par une courroie (fig. 9).

On appelle ***moment de la force*** le produit de l'intensité de la force $F$ par la distance $r$ de son support à l'axe de rotation.

$$\boxed{M = Fr} \quad (3)$$

$F$ étant donné en newtons et $r$ en mètres, le moment $M$ sera exprimé en ***mètres-newtons***.

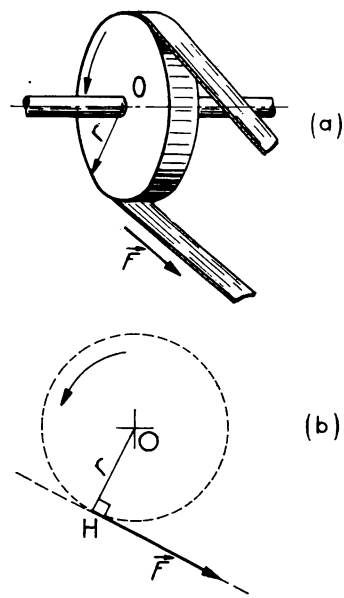



FIG. 9.

(1) NEWTON (1642-1727). Savant anglais célèbre pour ses travaux sur la gravitation universelle et sur la physique mathématique.

D'après la relation (3) :

« *Le mètre-newton est le moment, par rapport à un axe, d'une force de 1 newton dont le support est distant de 1 mètre de l'axe et lui est orthogonal* » (Vocabulaire Électrotechnique).

On appelle ***couple de forces*** — ou par abréviation : ***couple*** — deux forces égales, parallèles et de sens opposés, tendant à exercer une action de rotation sur un organe mobile autour d'un axe.

Ainsi en tournant un volant de voiture, en serrant un écrou à l'aide d'une clé-tube, ou encore en faisant tourner à deux mains une vis de presse, on développe un couple de forces (fig. 10).

Le moment $M$ d'un couple est le produit de l'intensité commune $F$ des deux forces par la distance $d$ de leurs supports (fig. 11).

$$\boxed{M = Fd}$$

$F$ en newton.
$M$ en mètre-newton.
$d$ en mètre.

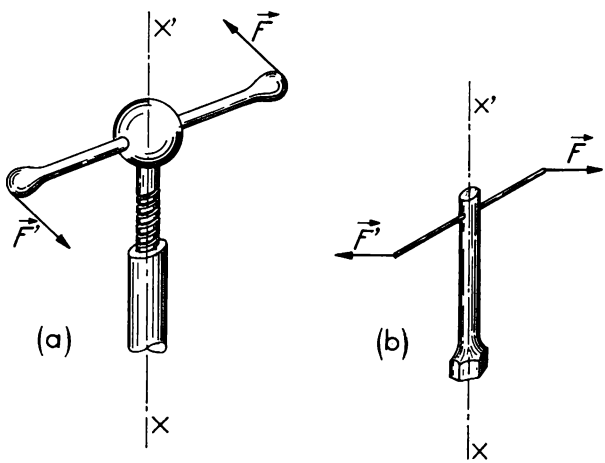



FIG. 10. — Vis de presse et clé-tube : $F' = F$.

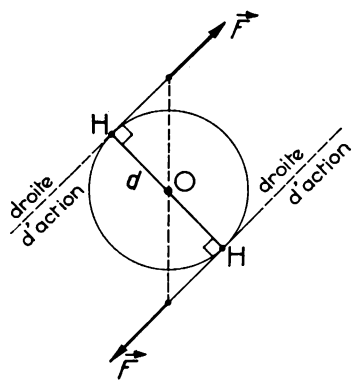



FIG. 11.

Lorsque le moment du couple représente l'action des forces pour faire tourner la pièce, on l'appelle ***couple moteur*** ; il y a d'autre part l'ensemble des forces qui s'opposent au déplacement (frottements, charges à soulever, ...) et qui constituent un ***couple résistant*** ; pour que le mouvement se produise, il faut que le couple moteur soit supérieur au couple résistant.

# B. — Travail et puissance

## I. — TRAVAIL

### *a*) Travail d'une force constante en grandeur et direction.

Une force constante déplaçant son point d'application en translation effectue un travail. Par exemple (fig. 12) une force $F$ est appliquée en A à un wagonnet ; si la force déplace son point d'application de A en B, d'une longueur $l$, on dit qu'elle effectue un travail qui a pour effet le déplacement de la charge du wagonnet de A en B.

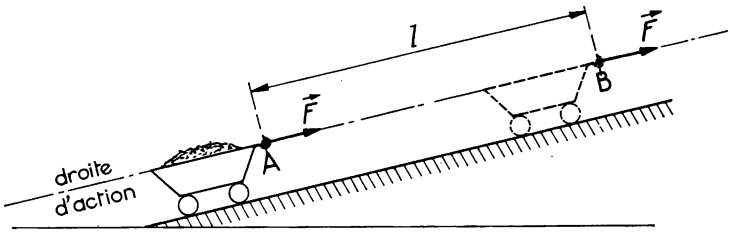



FIG. 12.

Si la force et le déplacement ont la même direction, la mesure du travail $W$ est le produit de l'intensité de la force par la longueur du déplacement.

$$\boxed{W = Fl.}$$

UNITÉ. — Dans la relation précédente, si $F$ est exprimée en newtons et $l$ en mètres, le travail $W$ sera exprimé en joules (J).

**Le joule est le travail produit par une force de 1 newton dont le point d'application se déplace de 1 mètre dans la direction de la force.**

REMARQUES.

1. Lorsque la force est le poids $P = mg$, d'un corps tombant d'une hauteur $h$, l'expression du travail s'écrit :

$$W = Ph = mgh.$$

2. Dans le cas général où la force et le déplacement font un angle $\alpha$ (fig. 13), le travail est donné par :

$$\boxed{W = Fl \cos \alpha}$$

$W$ en joule.
$F$ en newton.
$l$ en mètre.

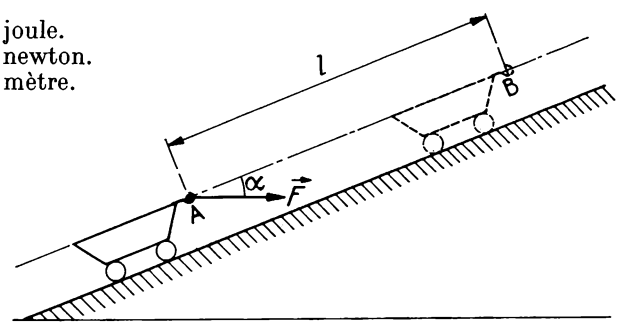



FIG. 13.

3. Si la force est exprimée en kilogramme-force, l'unité de travail est le *kilogrammètre* (kgm).

*Le kilogrammètre est le travail produit par une force de 1 kgf dont le point d'application se déplace de 1 mètre dans la direction de la force. Il faut noter que ces deux unités sont maintenant prohibées.*

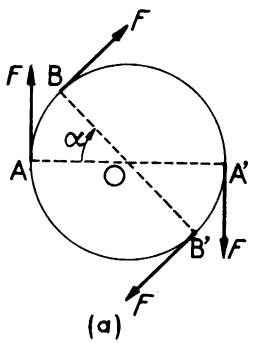
### *b*) **Travail d'un couple.**

Considérons un couple (*revoir* p. 10) tournant autour d'un axe (fig. 10 *a*); l'angle de rotation est exprimé en radian (fig. 10 *b*). Soit $d$ la distance des forces; on a :

$$OA = \frac{d}{2} \quad \text{et} \quad \text{arc } AB = \frac{d}{2}\alpha.$$

Le travail d'une force $F$ est donc $F \times \text{arc AB} = \frac{Fd}{2}\alpha = \frac{M}{2}\alpha$, et celui du couple :

$$\boxed{W = M\alpha} \quad \begin{cases} W \text{ en joule.} \\ M \text{ en mètre-newton.} \\ \alpha \text{ en radian.} \end{cases}$$



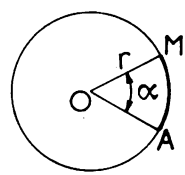




Fig. 14.

*a*) Couple de forces tangentielles appliquées à une poulie.

*b*) L'angle $\widehat{\alpha}$ vaut 1 radian si l'arc $\widehat{AM}$ est égal au rayon $r$.

Dans tous les cas : arc $AM = r\,\alpha$.
$2\pi$ radians = 360°; 1 rd = 57°18'.

## 2. — PUISSANCE

### *a*) **Un moteur est d'autant plus puissant qu'il produit plus de travail en un temps donné.**

Ainsi un monte-charge capable de monter à une certaine hauteur 2 tonnes en un temps donné, est *2 fois plus puissant* qu'un autre capable de monter 1 tonne à la même hauteur, *pendant le même temps.*

La notion de puissance est donc liée à la quantité de travail effectué en un temps donné ; elle caractérise les possibilités du moteur.

*b*) **Définition et unité.**

On appelle puissance $P$, le travail par seconde : $P = \frac{W}{t}$. L'unité S. I. de puissance est le **watt** (1) (symbole W), puissance de 1 joule par seconde:

$$\boxed{P = \frac{W}{t}} \quad \begin{cases} \text{P en watt.} \\ \text{W en joule.} \\ t \text{ en seconde.} \end{cases}$$

Le multiple usuel est le **kilowatt** (1 kW = 1 000 W); le **mégawatt** (1 MW = $10^6$ W) sert à exprimer les très grandes puissances (centrales électriques...) et le milliwatt (1 mW = $10^{-3}$ W) les très petites.

REMARQUE. Sont prohibées les unités anciennes : *kilogrammètre par seconde* (1 kgm /s = 9,81 W) et le *cheval vapeur* (1 ch = 75 kgm /s = 736 W).

*c*) **Unités d'énergie dérivées d'unités de puissance.**

On utilise la même relation $P = W/t$, mais sous la forme $W = P \times t$. Ainsi, pour $P = 1$ watt et $t = 1$ heure, on trouve $W = 1$ watt-heure (Wh) :

*Le watt-heure est l'énergie produite par une puissance constante de* 1 *watt pendant* 1 *heure.*

Notons que 1 J = 1 Ws, donc 1 Wh = 3 600 J.

Le multiple usuel est le kilowatt-heure : 1 kWh = 3 600 kJ.

Les très grandes quantités d'énergie (production d'une centrale...) s'expriment en mégawatt-heure (1 MWh = $10^6$ Wh).

*d*) **Expression de la puissance d'un couple en fonction de la vitesse angulaire.**

D'après $W = M\alpha$ (p. 12), on a $P = M\frac{\alpha}{t}$ et, en désignant la vitesse angulaire $\alpha/t$ par $\omega$ :

$$\boxed{P = M\omega} \quad \begin{cases} P \text{ en watt.} \\ M \text{ en mètre-newton.} \\ \omega \text{ en radian par seconde.} \end{cases}$$

Ou encore en fonction de la vitesse $n$ de rotation en tours par seconde ($\omega = 2\pi n$) :

$$\boxed{P = 2\pi nM.}$$

## 3. — ORDRE DE GRANDEUR DE PUISSANCES USUELLES

| | |
|---|---|
| Pour un homme (en action continue moyenne) | : 70 à 75 W. |
| Pour un cheval | : 700 W ($\approx$ 1 ch). |
| Pour un moteur d'automobile de série | : jusqu'à 150 kW. |
| Pour une locomotive électrique | : jusqu'à 4 000 kW. |
| Pour un réacteur d'avion | : jusqu'à 30 000 kW. |

(1) WATT (1736-1819). Ingénieur anglais connu par les réalisations et perfectionnements qu'il apporta à la machine à vapeur.

# C. — Tableau récapitulatif

Nous résumons, dans le tableau suivant, les unités mécaniques essentielles.

| Grandeur | Unité | Symbole | Relations entre unités |
|---|---|---|---|
| Longueur ..... | **mètre** | **m** | |
| Masse ..... | **kilogramme** | **kg** | |
| Temps..... | **seconde** | **s** | |
| Vitesse..... | **mètre par sec.** | m/s | |
| Accélération.... | **mètre par sec. par seconde** | $m/s^2$ | |
| Force ..... | **newton** | **N** | communique à une masse de 1 kg une accélération de 1 $m/s^2$ |
| Couple ..... | **mètre-newton** | **m.N** | |
| Travail ..... | **joule** | **J** | 1 J = 1 N × 1m |
| (Énergie) | wattheure | Wh | 1 Wh = 3 600 J |
| | kilowattheure | kWh | 1 kWh = 1 000 Wh |
| Puissance ..... | **watt** | **W** | 1 W = 1 J/s |
| | **kilowatt** | **kW** | 1 kW = 1 000 W |

# D. — Exercices résolus

**1.** *Un camion chargé ayant une masse totale de 1 tonne part de l'arrêt pour atteindre, en terrain plat, une vitesse de 36 km/h en 20 s ; en négligeant les frottements, on demande la force constante qui lui communique cette accélération.*

**Solution.**

La vitesse obtenue en 20 secondes après le démarrage est :

$$36 \text{ km/h ou } \frac{36\,000}{3\,600} = 10 \text{ m/s},$$

ce qui correspond à une accélération :

$$\gamma = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{10}{20} = 0{,}5 \text{ m/s}^2.$$

La force est donc :

$$F = m\gamma = 1\,000 \times 0{,}5 = 500 \text{ N}.$$

**2.** *Un moteur tourne à la vitesse de 3 000 tours par minute et la puissance mécanique utile sur son arbre est de 628 watts. Quel est le couple moteur?*

**Solution.**

La puissance mécanique sur l'arbre (ou puissance utile si l'on néglige certaines pertes, *voir* p. 130) est :

$$P_u = M\omega.$$

Mais la vitesse angulaire de rotation $\omega$ est telle que $\omega = 2\pi n$

On a : $$P_u = 2\pi nM.$$

On en déduit le couple moteur :

$$M = \frac{P_u}{2\pi n}$$

$$M = \frac{628}{2 \times 3{,}14 \times \frac{3\,000}{60}} = 2 \text{ m.N.}$$

**3.** *Un moteur de monte-charge soulève en 6 secondes une masse de 100 kilogrammes à 4 mètres de hauteur, quelle est la puissance mécanique utile?*

**Solution.**

Poids : $p = mg = 100 \times 9{,}81 = 981$ N.
Travail : $W = ph = 981 \times 4$ J.
Puissance mécanique utile du moteur :

$$P = \frac{W}{t} = \frac{981 \times 4}{6} = 654 \text{ W.}$$

## PROBLÈMES DE LA LEÇON I

**1.** Un moteur tournant à la vitesse de 2 000 tours par minute fournit une puissance mécanique $P_u = 62{,}8$ kilowatts. Calculer le couple moteur utile $M$.

**Réponse : $M = 300$ m.N.**

**2.** Un turbo-alternateur d'une centrale hydraulique a une puissance $P = 157$ mégawatts ; sachant qu'il tourne à la vitesse de 3 000 tours par minute, calculer le moment $M$ du couple moteur.

**Réponse : $M = 500\,000$ m.N.**

**3.** Quelle est la vitesse $n$ de rotation d'un moteur dont la puissance mécanique est $P_u = 14{,}7$ kW et le moment du couple moteur $M = 103$ mètres-newtons ?

**Réponse : $n = 22{,}7$ tr/s $\approx 1\,360$ tr/mn.**

**4.** Quelle est la force $F$ de traction d'une locomotive électrique développant une puissance mécanique $P_u = 1\,500$ kilowatts à 100 kilomètres/heure ?

**Réponse : $F \approx 54\,000$ N.**

**5.** Une balance frein permet d'équilibrer le couple d'un moteur ; on a disposé, dans le plateau de la balance dont le fléau mesure 0,5 mètre, une masse de 10 kilogrammes, pour réaliser cet équilibre. Le moteur tournant à la vitesse de 3 000 tours par minute, calculer la puissance utile $P_u$ de ce dernier.

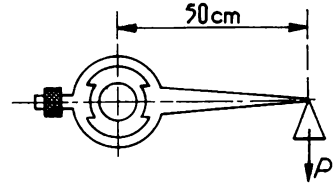



FIG. Pb 5.

**Réponse : $P_u = 15{,}4$ kW.**

**6.** Un corps soumis à des frottements est déplacé d'une longueur $l = 10$ mètres sous l'action d'une force $F = 10$ newtons qui lui est appliquée ; quelle est la valeur du travail $W$ accompli ?

**Réponse : $W = 100$ J.**

**7.** Une chute d'eau a un débit de 8 mètres cubes par seconde ; elle entraîne la roue à aubes d'une turbine située 50 mètres plus bas. Quelle est la puissance $P$ de la chute d'eau ?

**Réponse : $P \approx 3\,920$ kW.**

**8.** Quel est le travail résistant $W$ accompli par un homme dont le poids est $P = 80$ décanewtons en montant à un étage situé à une hauteur $h = 20$ mètres au-dessus du rez-de-chaussée ? Quelle est la caractéristique de ce travail ?

**Réponses : $W = 16\,000$ J ; le travail ne dépend pas du chemin suivi.**

**9.** Un satellite artificiel, de masse $m = 60$ kilogrammes, est placé à l'aide d'une fusée sur une orbite plane et circulaire, ayant pour centre celui de la Terre, et située à l'altitude $h = 790$ kilomètres. Son mouvement est uniforme et sa période de rotation autour de la Terre est de 100 minutes.

1° Quels sont le rayon et la longueur de la trajectoire circulaire ? On prendra comme rayon terrestre $R = 6\,360$ kilomètres et $\pi = 3{,}14$.

2° Calculer la vitesse angulaire $\omega$ du satellite et sa vitesse linéaire $v$ en mètres par seconde et en kilomètres par heure.

3° En admettant que la force centrifuge appliquée au centre de gravité du satellite est donnée par la relation $F = m\,\omega^2 R$, calculer cette force. En déduire l'accélération de la pesanteur à l'altitude du satellite, celui-ci n'étant supposé soumis qu'à son poids.

*(D'après Bacc. Sciences Exp.).*

**Réponses : 1° $R_t = 7\,150$ km ; $L \approx 44\,900$ km.**

**2° $\omega = \dfrac{\pi}{3\,000}$ rd/s ; $v \approx 7\,480$ m/s ou $\approx 26\,940$ km/h.**

**3° $g \approx 7{,}94$ m/s/s.**

**10.** On remorque une péniche à la vitesse $v = 6$ kilomètres par heure depuis la berge d'un canal rectiligne ; le câble de traction fait avec la direction du déplacement de cette péniche un angle constant $\alpha = 30$ degrés et transmet une force de 100 kilogrammes-force. Calculer :

*a*) En newtons, l'intensité de la force utile $F$ ($g = 9{,}81$ m/s²).

*b*) En joules, puis en kilojoules, le travail utile $W$ pour un déplacement $d = 500$ mètres.

*c*) En kilowatts, la puissance $P$ du tracteur.

**Réponses : a) $F = 849{,}5 \approx 850$ N ; b) $W = 424\,750$ J $\approx 425$ kJ ; c) $P \approx 1{,}4$ kW.**

# II. — ÉNERGIE

**MATÉRIEL UTILISÉ :**

— moteur électrique (0,2 kW) avec poulie sur son arbre ;
— ressort ;
— pour projections : diapositives de barrages, turbines, moteur à explosion.

## A. — Définition ; unités

### 1. — EXEMPLES ET DÉFINITION

Une chute d'eau peut entraîner une roue à aubes et produire du *travail*; la combustion du charbon, du fuel... peut produire du *travail* dans une turbine à vapeur; une cartouche d'explosif qui détache des rochers d'une carrière fournit un *travail* de rupture, etc. Nous verrons, dans les chapitres suivants, que le courant électrique peut également produire du *travail* dans un moteur électrique.
On dit que la chute d'eau, le charbon... le courant électrique possèdent de l'*énergie*; et plus généralement, que tout **système** qui produit ou peut produire du travail, possède de l'**énergie**.

DÉFINITION. — *L'énergie est la grandeur physique qui traduit le pouvoir d'un système de produire du travail.*

### 2. — UNITÉS

L'énergie, pouvoir de produire du travail, est mesurée avec la même unité que le travail ; on la représente par l'un des symboles $W$ ou $E$ et on l'exprime en ***joules*** (J) (voir I, § C pour les autres unités).

## B. — Formes de l'énergie

L'énergie a des formes très variées qui se transforment les unes en les autres.

### 1. — L'ÉNERGIE MÉCANIQUE

Elle peut être :

— **potentielle :** c'est l'énergie que possède un corps, en raison de son état actuel.

— Un ressort tendu, un gaz comprimé, fournissent un travail en se détendant.

— Une masse pesante de poids $P$, soulevée à une hauteur $h$, est capable en retombant de réaliser un travail.

— Un barrage retenant à un niveau $h_1$ un volume d'eau, de poids $P$, servant à alimenter des turbines hydrauliques situées en contrebas à un niveau $h_2$ (fig. 1) possède une énergie potentielle (*revoir* p. 11, remarque 1) :

$$W_p = P\ (h_1 - h_2) \quad \begin{cases} W_p \text{ en joule.} \\ P \text{ en newton.} \\ h_1,\ h_2 \text{ en mètre.} \end{cases}$$

qui dépend de $P$ et de la différence des niveaux.

— **cinétique** : c'est l'énergie que possède un corps en mouvement.

— Un projectile lancé traverse une paroi résistante.

— L'eau du barrage (fig. 2) dans sa chute acquiert une vitesse lui donnant une énergie cinétique capable d'entraîner les roues à aubes des turbines ; elle s'exprime, en fonction de la masse d'eau $m$ en mouvement et de la vitesse $v$, par :

$$W_c = \frac{1}{2} mv^2 \quad \begin{cases} W_c \text{ en joule.} \\ m \text{ en kilogramme.} \\ v \text{ en mètre par seconde.} \end{cases}$$

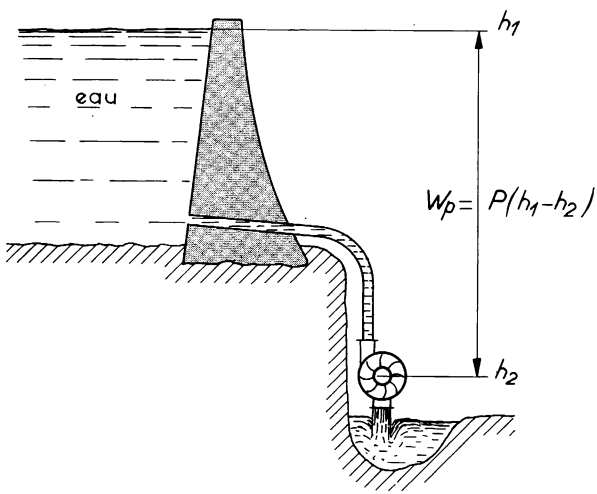



FIG. 1. — **Coupe schématique de barrage.**
L'eau emmagasinée possède en réserve une énergie dite *potentielle*.

Dans de nombreux phénomènes mécaniques, l'énergie potentielle se transforme en énergie cinétique ou inversement.

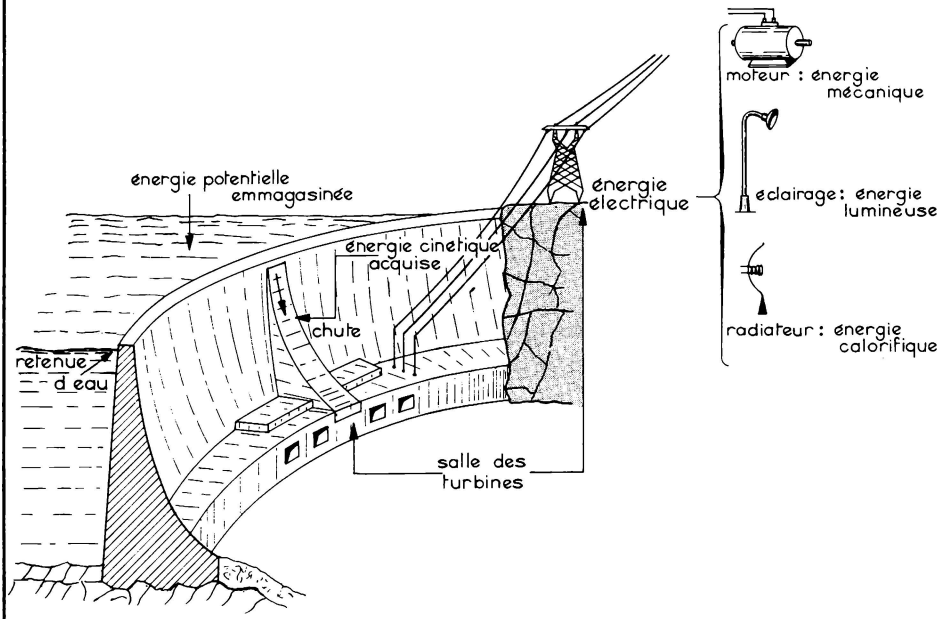
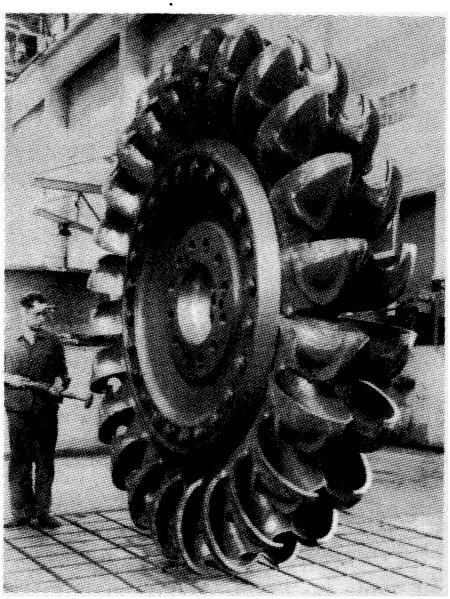



FIG. 2. — **Barrage et usine hydrauliques.**



**Roue à aubes.**

Centrale électrique de Malgovert (Savoie), 630 millions de kWh par an.

(*Document E. D. F.*)

## 2. — AUTRES FORMES DE L'ÉNERGIE

L'énergie est une grandeur très importante ; le niveau de vie d'un pays se mesure à l'énergie consommée par habitant.

Outre l'énergie mécanique, nous citerons :

**— L'énergie chimique.**

Un corps combustible (charbon, pétrole...) dégage de la chaleur en brûlant ; l'énergie calorifique obtenue est le résultat de la transformation chimique du mélange air-combustible par une réaction de combustion.

De même, c'est à partir d'une réaction chimique que l'on obtiendra de l'énergie électrique dans les piles et dans les accumulateurs (XIV, § A et B).

Avant la combustion des corps, avant l'utilisation des piles et des accumulateurs, l'énergie chimique est sous la forme potentielle.

**— L'énergie électrique (VII, § B)**

Elle est particulièrement remarquable pour ses possibilités multiples de transformation en d'autres formes d'énergie :

— énergie mécanique par les moteurs électriques ;

— énergie calorifique dans les radiateurs et fours électriques ;

— énergie chimique pour la charge des accumulateurs, la préparation des métaux (*exemple :* l'aluminium dans les cuves à électrolyse, chapitre XIII) ;

— énergie lumineuse pour l'éclairage par lampe à incandescence ou à décharge ;

— énergie rayonnante dans les rayons X, les ondes hertziennes.

**— L'énergie nucléaire.**

Elle est plus couramment appelée *énergie atomique ;* on la libère par *fission* des noyaux d'atomes lourds (uranium...) (III, § B), c'est-à-dire par division avec perte de masse, cette masse perdue étant transformée en énergie.

**— L'énergie thermique ou calorifique**

**1°** Elle est transformée en énergie mécanique dans les moteurs thermiques ; une machine à vapeur qui reçoit de la chaleur en transforme une partie en travail mécanique.

Mais on notera que si les diverses formes d'énergie citées sont transformables les unes en les autres, au cours de ces transformations il apparaît *toujours* de la chaleur, énergie alors perdue pour le but poursuivi.

Par exemple, dans un moteur électrique :

énergie électrique → énergie mécanique + chaleur dissipée.

**2° Équivalent en joules de la calorie.**

Le joule est l'unité légale, mais la ***calorie*** est une unité d'énergie très utilisée dans le cas particulier des quantités de chaleur.

*a*) ***Définition :***

**La calorie** (symbole : cal), encore appelée ***microthermie*** (symbole : $\mu$th), **est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré la température de 1 gramme d'eau.**

Elle a pour multiples :

— la *kilocalorie* (kcal) ou *millithermie* (mth) qui vaut 1 000 calories ($10^3$ cal) ;
— la *thermie* (th) qui vaut 1 million de calories ($10^6$ cal).

REMARQUE.

On notera que pour élever de 1 degré la température de 1 gramme de pétrole, il suffit de 0,5 calorie ; pour 1 gramme de cuivre, il faut 0,093 calorie ; pour 1 gramme de fer, il faut 0,116 calorie.

Ces quantités de chaleur sont les *chaleurs massiques* de ces corps.

*b*) ***Une calorie équivaut à 4,18 joules.***

Des mesures répétées et précises ont démontré que lorsque du travail se transforme en chaleur, il faut toujours fournir un travail de 4,18 joules pour obtenir 1 calorie ; ou encore : 1 joule équivaut à $\frac{1}{4{,}18} \approx 0{,}24$ calorie.

| 1 calorie équivaut à 4,18 joules. |
|---|
| 1 joule équivaut à 0,24 calorie. |

D'où : $1 \text{ Wh} = 0{,}24 \times 3\,600 = 864$ calories.

*c*) ***L'énergie thermique nécessaire pour élever la température d'un corps sans changer son état physique dépend de sa masse*** m ***et de sa chaleur massique*** c.

Pour un accroissement de température $\theta_2 - \theta_1$ (1) la quantité de chaleur nécessaire est :

$$q = m\,c\,(\theta_2 - \theta_1) \qquad \begin{cases} q \text{ en calorie.} \\ m \text{ en gramme.} \end{cases}$$

soit encore une énergie :

$$W = 4{,}18\,m\,c\,(\theta_2 - \theta_1) \qquad \begin{cases} W \text{ en joule.} \\ m \text{ en gramme.} \end{cases}$$

## 3. — RAPPEL DU PRINCIPE DE LA CONSERVATION DE L'ÉNERGIE

L'Homme puise l'énergie dans les sources naturelles ; en fait, il transforme certaines formes d'énergie en d'autres formes qui lui sont plus utiles, mais il ne fait ni augmenter ni diminuer la quantité totale d'énergie.

Un système est dit *isolé* lorsqu'il n'échange rien avec l'extérieur. Le principe est le suivant :

*L'énergie totale d'un système isolé reste constante.* En d'autres termes, s'il disparaît de l'énergie d'une certaine forme (électrique, mécanique, calorifique...), il en apparaît, en quantité équivalente, sous la même forme ou sous d'autres formes.

---

(1) $\theta$ se prononce *thêta* ; la variation $\theta_2$-$\theta_1$ s'écrit $\Delta\theta$ (*delta thêta*), $\Delta$ symbole de variation.

# C. — Rendement

Au cours de la transformation de l'énergie, *une partie seulement* de l'énergie initiale est convertie dans la forme désirée, c'est-à-dire en énergie utile.

Un moteur absorbe une énergie (chimique dans les moteurs à explosion, électrique dans les moteurs de ce nom) : il ne la restitue que partiellement sous la forme mécanique souhaitée ; pendant son fonctionnement, il s'échauffe et dissipe en chaleur une partie de l'énergie qu'il reçoit ; cette énergie dissipée en chaleur constitue une *perte* (fig. 3).

Dans les questions de rendement, on considère les énergies par seconde, c'est-à-dire les puissances (p. 12).

Soit $P_a$ la puissance absorbée, $P_u$ la puissance utile, $p = P_a - P_u$ la puissance perdue, $\eta$ *(êta)* le rendement.

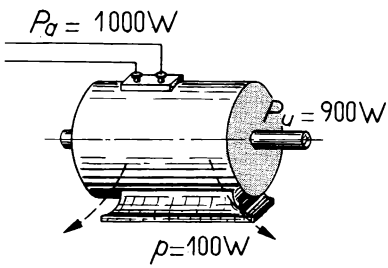



FIG. 3. — $\eta = \frac{P_u}{P_a} = 0{,}90$ ou 90 %.

**Le rendement est le rapport de la puissance utile à la puissance absorbée :**

$$\boxed{\eta = \frac{P_u}{P_a}}$$

$P_u < P_a$, donc $\eta < 1$.

En introduisant les pertes $p$, l'expression du rendement prend d'autres formes, souvent utilisées :

$$\eta = \frac{P_a - p}{P_a} = 1 - \frac{p}{P_a}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + p} = \frac{1}{1 + \frac{p}{P_u}}$$

# D. — Exercices résolus

**1.** *Un moteur électrique entraîne une pompe centrifuge permettant d'élever 100 litres d'eau à 4 mètres de hauteur en 6 secondes. Quelle est la puissance absorbée par le moteur si le rendement global moteur-transmission est 0,80?*

**Solution.**

La force qui doit s'exercer sur les 100 litres d'eau pour leur élévation est :

$$F = mg = 100 \times 9{,}81 = 981 \text{ newtons.}$$

Le travail nécessaire est :

$$W = Fl = 981 \times 4 \text{ joules}$$

correspondant à une puissance utile du moteur :

$$P_u = \frac{W}{t} = \frac{981 \times 4}{6} = 654 \text{ watts}$$

Pour fournir cette puissance utile, le moteur doit absorber la puissance :

$$P_a = \frac{P_u}{\eta} = \frac{654}{0,8} = 817,5 \text{ watts} \approx 818 \text{ watts.}$$

**2.** *Un barrage permet une retenue de 100 000 mètres cubes d'eau ; on demande :*

*a) L'énergie potentielle de la retenue d'eau servant à alimenter une turbine située à 50 mètres en contrebas du niveau moyen de l'eau.*

*b) La puissance de cette turbine sachant que 100 000 mètres cubes sont écoulés en 1 semaine. On donne* $g = 10\ m/s^2$.

**Solution.**

*a)* 1 m³ représente une masse de $10^3$ kg et $10^5$ m³ d'eau, $10^8$ kg de poids $p$ :

$$p = mg = 10^8 \cdot 10 = 10^9 \text{ N.}$$

L'énergie potentielle $W_p$ de la retenue du barrage est :

$$W_p = p\ (h_1 - h_2)$$
$$= 10^9 \cdot 50$$
$$\text{soit } W_p = 5 \cdot 10^{10} \text{ joules.}$$

Il est commode d'utiliser une unité multiple :

$$1 \text{ Wh} = 3\,600 \text{ J} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ J}$$
$$1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J.}$$

L'énergie potentielle s'écrit avec cette nouvelle unité :

$$W_p = \frac{5 \cdot 10^{10}}{3,6 \cdot 10^6} = \frac{5}{3,6} \cdot 10^4 \approx 1,4 \cdot 10^4 \text{ kWh.}$$

*b)* Puissance de la turbine :

$$P = \frac{W}{t}. \qquad \text{(kW, kWh, h)}$$

Nous avons

$$W = W_p = 1,4 \cdot 10^4 \text{ kWh}$$
$$t = 24 \times 7 = 168 \text{ heures}$$

$$P = \frac{1,4 \cdot 10^4}{168} = \frac{1,4 \cdot 10^4}{1,68 \cdot 10^2} = \frac{1,4}{1,68} \cdot 10^2 \approx 83 \text{ kW.}$$

**3.** *Calculer l'énergie cinétique d'une balle de fusil de masse 20 grammes projetée à la vitesse de 800 m/s?*

**Solution.**

L'expression de l'énergie cinétique d'un corps en mouvement nous donne :

$$W = \frac{1}{2} mv^2$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot 0,020 \times 640\,000 = 6\,400 \text{ J.}$$

**4.** *Le rendement calorifique d'un appareil de chauffage électrique étant 70 %, quelle est la quantité de chaleur dégagée par le courant pour amener à l'ébullition 10 litres d'eau prise à 16° C? Quelle est, en kilowattheures, l'énergie correspondante ?*

La quantité de chaleur nécessaire est :

$$Q = mc\ (\theta_2 - \theta_1) = 10 \times 1 \times (100 - 16) = 840 \text{ kilocalories.}$$

L'appareil de chauffage devra réellement fournir :

$$Q' = \frac{840 \times 100}{70} = 1\ 200 \text{ kilocalories.}$$

Or, 1 wattheure = 3 600 joules et 1 joule = 0,24 calorie ; il en découle :

$$1 \text{ kWh} = 0{,}24 \times 3{,}6 \cdot 10^3 \text{ kcal} = 864 \text{ kcal,}$$

d'où l'énergie cherchée :

$$W = \frac{Q'}{864} = \frac{1\ 200}{864} \approx 1{,}4 \text{ kWh.}$$

## PROBLÈMES DE LA LEÇON II

**1.** Quel est le travail mécanique $W$ nécessaire pour faire passer 100 grammes d'eau de 10° C à 45° C, en admettant qu'il soit totalement transformé en chaleur ?

**Réponse : $W \approx 14{,}6$ kJ.**

**2.** Une pompe centrifuge entraînée par un moteur électrique élève 400 litres d'eau à une hauteur $h = 9$ mètres en un temps $t = 10$ secondes. Quelle est la puissance $P_a$ consommée par le moteur si le rendement de l'installation est $\eta = 0{,}80$ ?

**Réponse : $P_a = 4\ 415$ W $\approx 4{,}4$ kW.**

**3.** Une masse $m = 5$ tonnes est élevée en 25 secondes à une hauteur $h = 4$ mètres par une grue dont le rendement est $\eta = 0{,}80$. Calculer la puissance utile $P_u$ du moteur d'entraînement. On donne $g = 9{,}8$ m/s².

**Réponse : $P_u \approx 9{,}8$ kW.**

**4.** Un réservoir d'eau de 200 mètres cubes doit être rempli par une pompe électrique qui élève l'eau à une hauteur $h = 6$ mètres ; le réservoir est plein en 4 heures. Le rendement de la pompe est $\eta = 0{,}75$ et celui du moteur électrique $\eta' = 0{,}85$.
Quelle doit être la puissance mécanique $P_u$ du moteur ?
Quelle sera la puissance absorbée $P_a$ par le moteur ? On donne $g = 9{,}81$ m/s²
*(C. A. P., 1968 ; Paris.)*

**Réponses : $P_u = 1\ 090$ W ; $P_a \approx 1\ 280$ W.**

**5.** Un moteur dont la puissance mécanique est $P_u = 2{,}4$ kilowatts entraîne une poulie à la vitesse de 1 200 tours par minute à l'aide d'une transmission souple. Calculer le moment $M$ du couple moteur si l'on admet un rendement de la transmission $\eta = 0{,}90$.

**Réponse : $M = 17{,}2$ m.N.**

**6.** Un moteur de rendement $\eta = 0{,}80$ fournit une puissance utile $P_u = 11{,}75$ kilowatts et sa vitesse de rotation est 720 tours par minute.
Quelle est la puissance $P_a$ absorbée par le moteur ? Quel est le moment $M$ du couple utile ?

**Réponses : $P_a = 14{,}7$ kW ; $M \approx 156$ m.N.**

**7.** Dans une centrale thermique, un générateur dont le rendement est $\eta = 0{,}80$ fournit une énergie $W = 28\,080$ kilowattheures en 9 heures.
Quelle est la puissance utile $P_u$ du générateur ? Quelle est la puissance $P_a$ qu'il absorbe ?

**Réponses : $P_u = 3\,120$ kW ; $P_a = 3\,900$ kW.**

**8.** Un fer à repasser porte sur sa plaque signalétique : 750 watts.
On le fait fonctionner pendant une demi-heure : exprimer l'énergie $W$ consommée en joules, puis en wattheures.

**Réponse : $W = 1\,350$ kJ ou 375 Wh.**

**9.** Sachant qu'un radiateur électrique absorbe 90 kilojoules en 1 minute, quelle est, en wattheures, l'énergie absorbée $W$ en une demi-heure ? Quelle est la quantité $q$ de chaleur correspondante, exprimée en thermies ?

**Réponses : $W = 750$ Wh ; $q = 0{,}648$ th.**

**10.** Un électron, initialement au repos, de masse $m = 9 \times 10^{-31}$ kilogramme est soumis à un champ électrique qui lui communique un mouvement uniformément accéléré. Au bout du temps $t = 3 \times 10^{-8}$ seconde, il a atteint une vitesse $v = 6\,000$ kilomètres par seconde.

*a*) Calculer son énergie cinétique $W_c$.

*b*) Calculer son accélération $\gamma$.

*(Extrait Bacc. 1966, Paris ; option Philo.)*

**Réponses : a) $W = 1{,}62.10^{-17}$ J ; b) $\gamma = 2.\,10^{14}$ m/s/s.**

**11.** On lâche en chute verticale et sans vitesse initiale une bille de masse $m = 200$ grammes. On admet que la résistance de l'air est négligeable et que l'espace parcouru $e$ est exprimé par la relation $e = \frac{1}{2}\,gt^2$.

*a*) Calculer :
— la hauteur de chute de la bille au bout du temps $t = 3$ secondes ;
— la variation de son énergie potentielle $W_p$ ;
— l'énergie cinétique acquise $W_c$.

*b*) A la fin de sa course de 3 secondes, elle rebondit verticalement en perdant le quart de son énergie cinétique ; calculer la hauteur à laquelle la bille rebondira.

*(Extrait Bacc. Philosophie ; Paris, 1966.)*

**Réponses : a) $h \approx 44{,}1$ m ; $W_c = 86{,}5$ J. b) $h' = 33{,}1$ m.**

**12.** Un moteur électrique entraîne un treuil par l'intermédiaire d'un réducteur de vitesse de rapport $\frac{1}{20}$ ; le rendement de l'ensemble réducteur-treuil est $\eta = 0{,}60$ ; le tambour du treuil sur lequel s'enroule le câble de traction est un cylindre de diamètre 0,20 mètre. Dans tout le problème, on prendra $\pi = 3{,}14$, l'accélération de la pesanteur $g = 9{,}80$ m/s/s et il ne sera pas tenu compte de la masse du câble ni de sa raideur.
Quand le câble soulève verticalement une charge de 200 kilogrammes à la vitesse constante 0,54 mètre par seconde, calculer pour le moteur :

1° La vitesse angulaire.

2° La puissance utile.

3° Le couple moteur. *(Extrait Bacc. Mathématique Technique ; Paris, 1966.)*

**Réponses : 1° 108 rd/s ; 2° $P_u = 1\,764$ W ; 3° M = 16,3 m.N.**

**13.** 1° Une voiture automobile a une masse de 800 kilogrammes. Elle roule sur une route horizontale à la vitesse de 36 kilomètres par heure.
Calculer en joules son énergie cinétique.

2° Ce véhicule s'arrête à un feu rouge, puis démarre et atteint à nouveau la vitesse de 36 kilomètres/heure. Au cours de cette accélération, le rendement de son moteur est de 10 %. Calculer le volume d'essence consommé pendant ce démarrage, sachant que le pouvoir calorifique de l'essence est de 10 000 kilocalories par décimètre cube.

3° Le même véhicule, roulant sur une route horizontale à la vitesse de 72 kilomètres par heure, consomme 7 litres d'essence à l'heure, le rendement du moteur étant 23 %. Quelle est, en joules, l'énergie dépensée pour faire mouvoir le véhicule sur une distance de 1 kilomètre ?

4° Quelle est, en newtons, la force résultante de frottement ?
On rappelle que : $J = 4\,185$ joules par kilocalorie.

*(Bacc. Sciences expérimentales ; 1959.)*

**Réponses : 1°** $W_c = 40\,000$ **J ; 2°** $v \approx 9{,}6$ **cm³ ; 3°** $W' = 936$ **kJ ; 4°** $F_f = 936$ **N.**

# III. — NOTIONS D'ÉLECTROSTATIQUE

**MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL :**

— tige de verre ;
— bâton de résine ;
— pendule avec fil de soie et boule en moelle de sureau ;
— électroscope ;
— chiffon de laine ou peau de chamois ;
— tige isolante (bakélite par exemple) ;
— tige conductrice (cuivre, aluminium...) ;
— pour projections : diapositives sur les atomes.

## A. — Électrisation des substances[1]

### I. — TOUTE SUBSTANCE PEUT ÊTRE « ÉLECTRISÉE » PAR FROTTEMENT

*a*) Une tige de verre B (fig. 1) *frottée* avec un chiffon de laine sec **attire** une boule légère A en moelle de sureau suspendue par un fil de soie : on dit qu'elle s'est **électrisée** ou qu'elle a acquis une **charge électrique** ; cette électrisation n'apparaît qu'aux points frottés : elle reste **localisée**.

Il en serait de même avec un bâton B′ de résine, de soufre ou encore d'ébonite, de nylon...

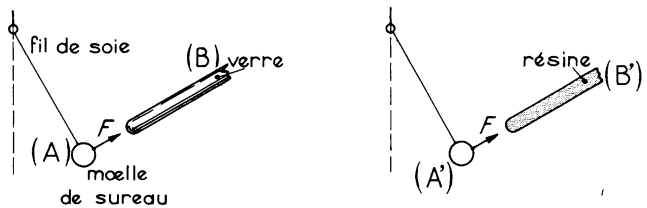



FIG. 1. — Les charges électriques restent localisées aux extrémités frottées du verre et de la résine et attirent un pendule électrique.

(1) *Électrostatique* : partie de la science qui traite des phénomènes de l'électricité en équilibre.
*Électrocinétique* : partie de la science qui traite de l'électricité en mouvement (leçon IV et suivantes).

*b*) Répétons l'expérience avec une tige métallique (cuivre, aluminium...) **tenue à la main** (fig. 2 *a*) : le pendule reste immobile.

Puis recommençons en tenant la tige métallique frottée *par l'intermédiaire* d'un bâton de résine ou de verre : le pendule est attiré (fig. 2 *b*).

L'électrisation se répand sur toute la surface du métal frotté (fig. 2 *c*).

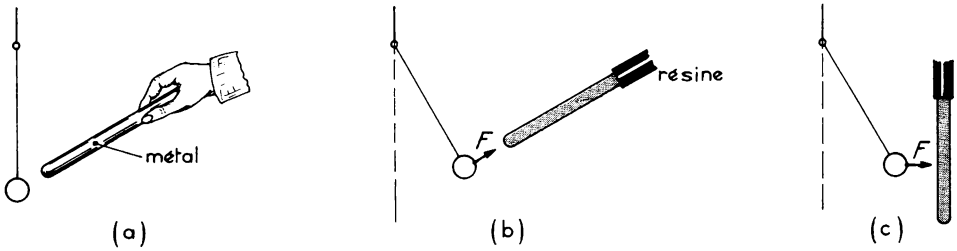



FIG. 2. — Les charges électriques des métaux ne restent pas localisées : le corps humain permet leur écoulement, tandis que les substances telles que la résine l'arrêtent.

## 2. — IL EXISTE DEUX ESPÈCES D'ÉLECTRICITÉ

— La tige de verre B frottée attire A : si A vient au contact de B, A s'électrise à son tour (1) et B le repousse aussitôt (fig. 3).

— Le bâton de résine B′ frotté attire A électrisé par son contact avec B, tandis que celui-ci attire A′ électrisé par B′ (fig. 4).

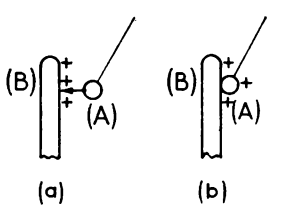



FIG. 3. — L'électricité de type « vitreux » est positive (+).
L'électricité de type « résineux » est négative (—).

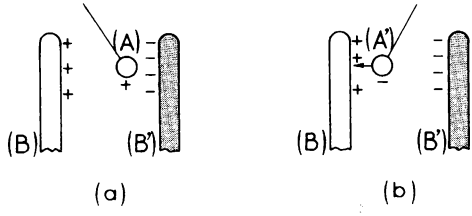



FIG. 4. — Deux corps chargés de la même espèce d'électricité se repoussent. Deux corps chargés d'espèces différentes d'électricité s'attirent.

L'électrisation est donc différente suivant que l'on utilise du verre ou de la résine, et les réactions sont également différentes :

*a*) Pour les corps qui réagissent **comme le verre**, on dit qu'ils se chargent d'*électricité positive.*

Pour ceux qui réagissent **comme la résine**, on dit qu'ils se chargent d'*électricité négative.*

*b*) Les expériences ci-dessus montrent que :

Deux corps chargés d'électricité de même nom se repoussent ; chargés d'électricité de noms contraires, ils s'attirent.

---

(1) Avant cette *électrisation par contact*, le pendule A était électrisé par *influence* (*voir* Fasc. III, p. 8).

# B. — Nature de l'électricité

## 1. — La matière est faite de molécules.

Considérons une certaine quantité de ***matière***, de l'eau par exemple. Divisons cette eau en 2, 3... 10 volumes, en gouttes, puis goutelettes de plus en plus fines ; s'il était possible de continuer cette division, nous obtiendrions une particule d'eau qui ne peut plus être divisée sans perdre ses propriétés ; la matière est constituée de particules extrêmement petites : les ***molécules***.

Un corps dit *pur* — par opposition à *mélange* — est constitué de molécules identiques ; ainsi 18 grammes d'eau contiennent $6 \times 10^{23}$ molécules d'eau, soit le chiffre 6 suivi de 23 zéros.

*Agitation thermique.* — Les molécules d'un corps sont en perpétuels mouvements désordonnés et l'énergie moyenne d'une molécule, nulle au zéro absolu (— 273 °C), augmente avec la température.

## 2. — La molécule est elle-même constituée d'atomes.

L'eau peut être décomposée en hydrogène et oxygène : sa molécule (fig. 5) est donc un assemblage de systèmes plus petits, appelés atomes (1). Toute molécule d'un corps contient plusieurs atomes, identiques ou non, suivant que le corps est simple ou composé (2).

*L'atome d'un élément est la plus petite partie de cet élément qui puisse entrer dans la constitution de molécules.*

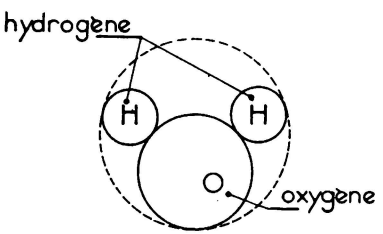
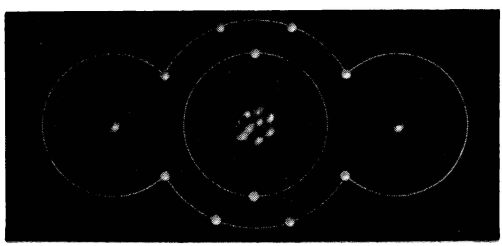



FIG. 5.
La représentation symbolique de la molécule d'eau est $H_2O$.



(*Document Haut-Commissariat à l'Énergie Atomique.*)
Une molécule d'eau formée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène.

## 3. — Chaque atome est caractérisé par un nombre d'*électrons* gravitant autour d'un *noyau* central.

*a*) L'électron est le plus petit « grain » indivisible d'**électricité négative** que l'on puisse trouver ; *à chaque atome est attaché un nombre déterminé d'électrons*

---

(1) Une molécule d'eau est représentée par la formule $H_2O$, car elle est formée de deux atomes de l'*élément* hydrogène et d'un atome de l'*élément* oxygène. On distingue l'élément oxygène (O) du corps simple gazeux oxygène ($O_2$) dont les molécules sont formées de deux atomes.

(2) Seuls quelques corps simples dits monoatomiques (argon, néon, mercure...) ont une molécule formée d'un seul atome.

qui le caractérise ; ces électrons gravitent autour d'un noyau central sur des orbites situées à différentes distances du noyau (fig. 6 *a* et *b*) qui correspondent à autant de niveaux d'énergie. Ainsi 1 électron pour l'hydrogène, 8 pour l'oxygène, 92 pour l'uranium.

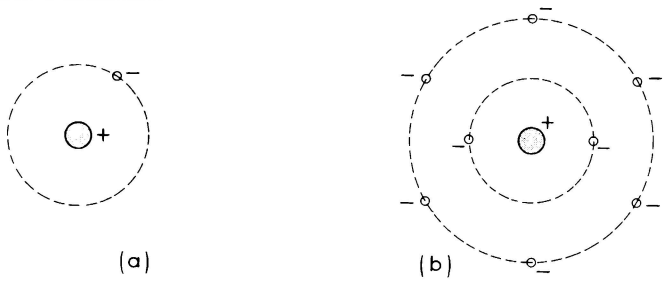
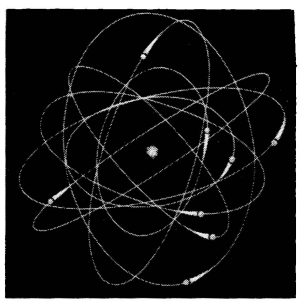
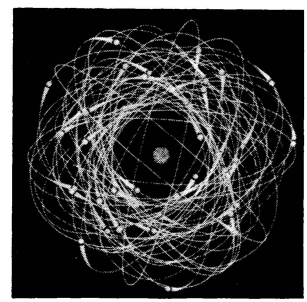



FIG. 6. — *a*) Atome d'hydrogène : 1 électron, 1 orbite.
*b*) Atome d'oxygène : 8 électrons, 2 orbites.

Charges : d'un électron : — *e*; du noyau d'hydrogène : + *e*; du noyau d'oxygène : + 8 *e*.



Atome d'oxygène.



Atome d'uranium 238.

(*Documents Haut-Commissariat à l'Énergie Atomique.*)

*b*) *Le noyau.*

L'atome complet étant électriquement neutre, le noyau est **nécessairement chargé d'électricité positive** en quantité équivalente à celle des charges d'électricité négative des électrons. Les constituants du noyau sont appelés ***nucléons*** ; ce sont les ***protons***, particules positives et les ***neutrons***, particules neutres.

Le noyau est pesant : sa masse est très grande devant celle d'un électron, la masse de chaque nucléon étant environ 1 840 fois celle d'un électron.

c) *Le vide absolu sépare le noyau central des électrons.*

Aux dimensions infiniment petites des électrons et des noyaux, et toutes proportions gardées, les distances qui séparent le noyau des électrons, ou les électrons entre eux, sont très grandes.

# C. — Corps conducteurs ; corps isolants

### 1. — Électrons périphériques d'un atome.

Ce sont les électrons de la couche externe, donc les moins attirés par le noyau ; on les appelle aussi *électrons de valence* parce qu'ils assurent les liaisons chimiques entre atomes.

Sous l'action d'une énergie relativement petite (choc dû à l'agitation thermique...) ils échappent à l'attraction du noyau et quittent l'atome ; la charge positive du noyau n'est plus entièrement compensée : l'atome est devenu un *ion positif*. Des électrons *libres* errent dans le corps.

Inversement, lorsqu'un atome capte un ou plusieurs électrons supplémentaires, il devient un *ion négatif*.

### 2. — Charges électriques.

Ce qui précède permet de comprendre que, dans les expériences du § A, un corps est chargé :

— *négativement* lorsqu'il possède des *électrons en excès* par rapport à l'état neutre ;
— *positivement* lorsqu'il possède *moins d'électrons* que dans l'état neutre.

*a*) La charge électrique est une grandeur physique, notée $q$ ou $Q$ ; celle d'un proton est notée $+ e$, celle d'un électron, de même valeur absolue, $- e$ ; cette charge $e$, la plus petite qui existe dans la nature, est dite **charge élémentaire**.

Pour des raisons que nous verrons dans la leçon V, l'unité S. I. de charge électrique est celle de $6{,}25 \cdot 10^{18}$ protons, elle est appelée ***coulomb*** (symbole C) :

$$1 \text{ C} = 6{,}25 \cdot 10^{18}\ e.$$

*b*) **Loi de Coulomb.** Deux charges électriques ponctuelles (1) exercent l'une sur l'autre une force :

— dirigée suivant la droite qui les joint ;
— proportionnelle à chacune des charges, donc à leur produit ;
— inversement proportionnelle au carré de leur distance :

$$\boxed{F = 9 \cdot 10^9 \frac{qq'}{d^2}} \quad \begin{cases} F \text{ en newton} \\ q,\ q' \text{ en coulomb} \\ d \text{ en mètre.} \end{cases}$$

### 3. — Corps conducteurs (métaux, alliages métalliques).

Ce sont les corps caractérisés par un *nombre important d'électrons libres* de se déplacer (en moyenne 1 électron libre par atome) ; ils constituent la catégorie des corps pour lesquels l'électrisation obtenue par frottement (§ A. 1) se répand sur toute leur surface.

### 4. — Corps isolants (verre, résine, ébonite, matières plastiques...).

Les électrons restent liés aux atomes et le *nombre d'électrons libres* est *négligeable* par rapport au nombre des atomes ; ce sont les corps pour lesquels l'électrisation obtenue (§ A. 1) reste localisée (2).

---

(1) Assimilables à un point, c'est-à-dire de dimensions très petites par rapport à leur distance.
(2) Il existe aussi des corps intermédiaires entre les conducteurs et les isolants (voir *semi-conducteurs*, p. 92, et fasc. IV, dans lequel nous les étudions).

### PROBLÈME DE LA LEÇON III

**1.** Calculer, d'après le § C 2, la charge élémentaire $e$.

**Réponse : $e = 1{,}60.10^{-19}$ coulomb.**

**2.** Quel est le nombre d'électrons en excès sur un corps portant la charge électrique $q = -2{,}2.10^{-8}$ C?

**Réponse : $1{,}38.10^{11}$.**

**3.** Deux pendules sont constitués chacun d'une sphère métallisée, de très faible rayon et de masse $m = 500$ milligrammes ; ils sont suspendus en des points $O_1$ et $O_2$ distants de 1 centimètre, par un fil isolant en soie de longueur $l = 25$ centimètres.

On charge par contact chacune des sphères, d'une même quantité d'électricité de même nature : elles s'écartent l'une de l'autre d'un angle $\alpha = 8°$ par rapport à la verticale.

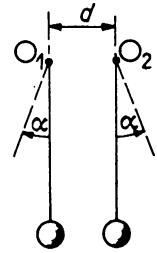


FIG. Pb 3.

1° Représenter toutes les forces agissantes lorsque l'équilibre est atteint.

2° Calculer :

*a*) La force électrique $F$ s'exerçant sur chaque sphère; on admettra que la force est horizontale et on prendra $g = 9{,}80$ m/s².

*b*) La distance $d'$ qui sépare les sphères à l'équilibre.

*c*) La charge électrique $q$ de chaque sphère.

**Réponses : a) $F = 0{,}69.10^{-3}$ N ; b) $d' = 7{,}95.10^{-2}$ m ; c) $q \approx 2{,}2.10^{-8}$ C.**

## LECTURE — Applications industrielles de l'électrostatique

Loin de rester limitée à des expériences de laboratoire, l'électrostatique a trouvé d'importantes applications :

— **La précipitation des fumées et poussières.**

L'élimination des fumées et des poussières des cheminées d'usine dans le but de lutter contre la pollution atmosphérique est un problème préoccupant que l'électrostatique a permis de résoudre. Le procédé est le suivant :
On filtre les gaz *sans utiliser un filtre*, tel que l'on le conçoit ordinairement ; le passage des gaz et fumées s'effectue dans des canaux de large section et de longueur relativement faible, sans rencontrer d'autre résistance que la résistance de frottement dans ces canaux. On y a *tendu longitudinalement des fils* portés à une tension de l'ordre de 50 000 à 100 000 volts. Les charges électriques qu'ils émettent chargent à leur tour les particules de poussière qui sont entraînées par le champ électrique et *précipitées* sur les parois des canaux.

— **La pulvérisation des liquides.**

Nous n'exposerons pas le principe de la division des liquides sous l'effet des forces électrostatiques. Retenons seulement l'utilisation, devenue courante, des forces électrostatiques pour appliquer, pulvériser ou diviser des liquides ou des solides.
Elle supplante en effet, par son économie, son rendement et sa précision, la pulvérisation des liquides par le procédé utilisant des forces aérodynamiques (pistolet à air comprimé pour peinture...) ; on peut pulvériser des liquides avec des puissances de 1 watt alors qu'un appareil à air comprimé dépenserait près de 700 watts.

— **L'attraction des pièces non magnétiques par effet électrostatique.**

On verra (fascicule II), que les électro-aimants attirent les matériaux magnétiques, tels que fer, acier. L'équivalent électrostatique des électro-aimants permet de réaliser des plateaux susceptibles d'attraction sur n'importe quel matériau. Ainsi, il existe maintenant des plateaux qui se montent sur une machine-outil et qui attirent toutes les pièces que l'on veut rectifier, indépendamment de la nature de ces dernières.

# IV. — COURANT ÉLECTRIQUE

**MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL :**

— batterie d'accumulateurs 6 ou 12 V;
— lampe électrique 6 V ou 12 V;
— cuve rectangulaire en verre;
— deux plaques de fer (1 mm d'épaisseur);
— solution de soude ;
— fil de cuivre;
— tige isolante (bakélite);
— boussole ou aiguille aimantée;
— interrupteur;
— fils de connexions;
— pour projection : diapositives d'installations réalisées avec appareillages divers.

## A. — Manifestations d'un courant

### I. — NOTION DE CIRCUIT ÉLECTRIQUE

Réalisons le montage représenté (fig. 1) ; il comprend :

— une batterie d'accumulateurs semblable à celle que vous avez observée sur toute voiture automobile; elle possède deux bornes P et N ;
— une lampe électrique L(1) ;
— une cuve V en verre, contenant une solution de soude à 10 %, dans laquelle plongent deux lames de fer A et C : l'appareil se nomme un *voltamètre*, les lames servant à amener le courant : *électrodes ;*
— un fil de cuivre tendu entre deux bornes E et F sur un socle de bois et disposé parallèlement à une petite boussole;
— un interrupteur K.

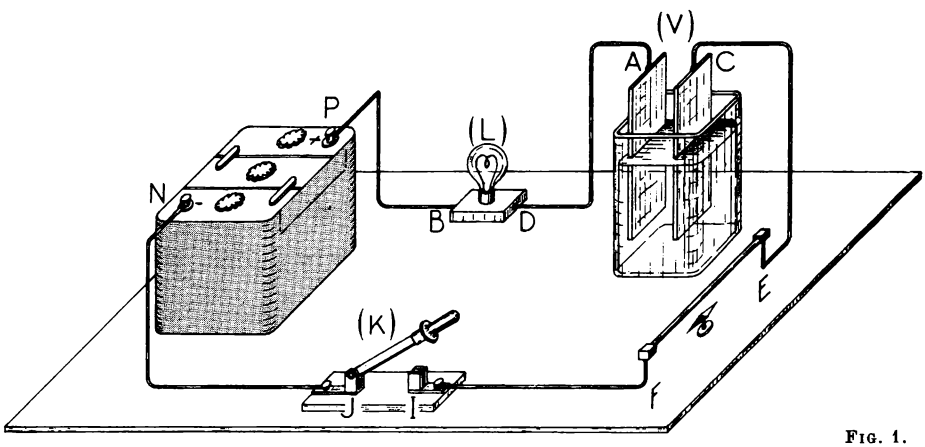



FIG. 1.

(1) Pour le Professeur; exemple de réalisation : batterie 12 V; lampe 12 V - 15 W; I.~ 1 A.

Avec des fils métalliques, nous réunissons la borne P de la batterie d'accumulateurs à l'entrée B de la lampe ; puis sa sortie D à la première plaque A du voltamètre ; de même, réalisons les liaisons CE, FI, IJ et JN : le circuit est alors fermé.

Tous ces appareils sont disposés les uns à la suite des autres : on dit qu'ils sont *montés en série ;* et ils sont reliés entre eux par des fils appelés *fils de connexion.* L'ensemble, appareils et connexions, constitue un **circuit électrique.**

Un circuit électrique se représente par un *schéma* dans lequel chaque appareil est figuré par un *symbole* (généralement normalisé). La figure 2 donne le schéma correspondant au montage réel de la figure 1.

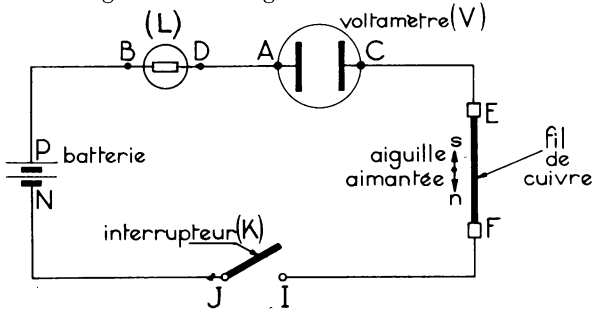



FIG. 2. — La représentation conventionnelle d'un circuit est un *schéma* : à chaque organe correspond un symbole.

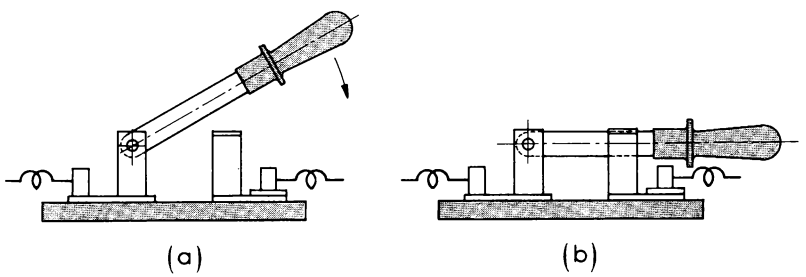



FIG. 3. — **Interrupteur.**

## 2. — LES EFFETS D'UN COURANT

L'interrupteur K étant maintenu dans la position ouverte (fig. 3 *a*), *le circuit est ouvert :* aucun phénomène ne s'y produit.

L'interrupteur est placé dans la position de la figure 3 *b* : *le circuit est fermé ;* nous observons aussi plusieurs phénomènes simultanés :

*a*) **Un effet calorifique :**

Le filament très fin de la lampe est rendu incandescent, sa température atteignant environ 2500 °C, une émission de lumière en résulte.

*b*) **Un effet chimique :**

Des bulles apparaissent sur chaque plaque du voltamètre : le courant traverse la solution en la décomposant (électrolyse, ch. XIII). Si l'on recueille les gaz, on constate qu'il s'agit d'hydrogène sur la lame C et d'oxygène sur la lame A (*voir* p. 44).

*c*) **Un effet magnétique :**

L'aiguille de la boussole dévie.

Les effets observés dans cet exemple manifestent l'existence, dans le circuit fermé, d'un **courant électrique.**

## 3. — LES CONDITIONS D'UN COURANT ÉLECTRIQUE

*a*) **Le courant ne peut circuler que si le circuit est constitué d'une suite ininterrompue de conducteurs.**

— Examinons le montage de la figure 4 *a* ; le courant électrique traverse des corps de natures différentes : tige de cuivre, fils de liaison, tungstène constituant le filament des lampes, eau acidulée et plaques de plomb des accumulateurs.

— Entre les points A et B, remplaçons alors le fil de cuivre par une tige de verre : la lampe reste éteinte; le passage du courant est interrompu.

— Considérons maintenant le circuit fermé (fig. 4 *b*) ; remplaçons l'interrupteur par une cuve contenant de l'eau acidulée dans laquelle plongent les extrémités des fils métalliques aboutissant aux points I et J : la lampe s'allume, l'eau acidulée laisse circuler le courant.

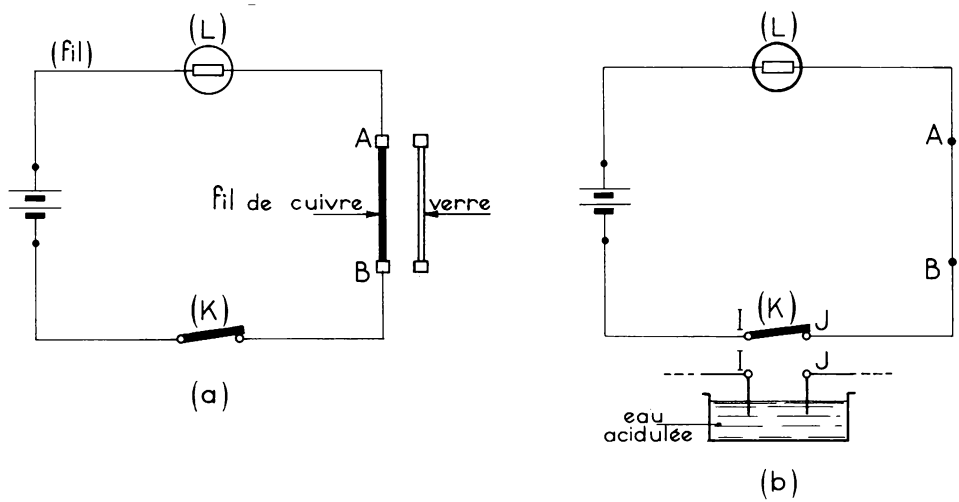



FIG. 4. — *a*) Le cuivre est un conducteur, le verre est un isolant.
*b*) L'eau qui n'est pas pure est un conducteur.

Ces expériences montrent que seuls certains corps laissent passer le courant : ce sont les corps qui appartiennent à la classe des *corps conducteurs* (III § C). Les métaux et leurs alliages sont des conducteurs : le fer, le cuivre, l'aluminium, l'argent... ; également certains métalloïdes comme le carbone, le graphite et toutes solutions aqueuses d'acides, de bases et de sels métalliques.

Les corps qui ne permettent pas la circulation du courant appartiennent à la classe des *corps isolants* (III § C).

Le verre, la porcelaine, le caoutchouc, le bois, le papier, les matières plastiques, le soufre, la paraffine, la résine sont des isolants solides.

L'alcool, le pétrole, les huiles de moteur, l'eau quand elle est pure, sont des isolants liquides.

*L'air est un isolant:* en effet toute coupure d'une connexion, par exemple à l'aide d'un interrupteur, supprime le courant.

### *b*) Le courant ne peut circuler que si le circuit possède un générateur.

Considérons à nouveau le montage de la figure 1 et remplaçons la batterie d'accumulateurs par un conducteur : nous n'obtenons plus de courant électrique.

Le courant était donc produit par la batterie d'accumulateurs ; c'est pourquoi on dit que cette batterie est un **générateur** électrique : un générateur fournit l'énergie électrique au circuit qu'il alimente. Les piles sont un autre exemple très connu de générateur (chap. XIV) ; de même les génératrices (Fasc. II, chap. X).

Par contre la lampe transforme l'énergie électrique reçue en énergie calorifique et radiante, le voltamètre transforme l'énergie électrique en énergie chimique : ce sont des **récepteurs** ; un moteur électrique est un autre type important de récepteur, il transforme l'énergie électrique reçue en énergie mécanique (Fasc. II, chap. XIII).

### *c*) Conclusion.

*Un circuit électrique est donc une suite ininterrompue de corps conducteurs parcourus par un courant électrique : il comporte un générateur (source), un ou des récepteurs (appareils utilisateurs) reliés par des connexions (fig. 5). Les effets du courant se manifestent en même temps lorsque le courant s'établit et ils disparaissent avec lui.*

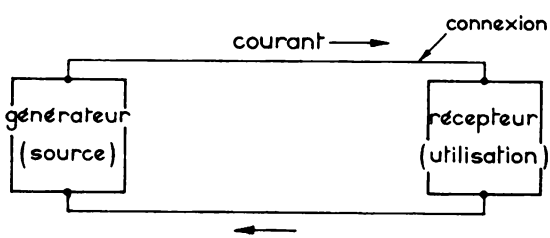



FIG. 5. — Un circuit électrique possède une *source* et des éléments *récepteurs* reliés par des *connexions*.

# B. — Nature du courant

C'est sous l'action d'un générateur que les électrons libres des conducteurs sont mis en mouvement pour constituer un courant électrique (fig. 6).

En effet, un générateur est caractérisé par une dissymétrie interne; par exemple des électrodes de compositions chimiques différentes dans les piles et les accumulateurs ; il en résulte un **excès** d'électrons au pôle négatif, une **pénurie** d'électrons au pôle positif. Lorsqu'on relie par un fil conducteur les deux bornes du générateur, celui-ci exerce, par ses électrons en excès au pôle négatif, une poussée qui se propage de proche en proche sur tous les électrons libres du fil métallique, jusqu'au pôle positif.

A la manière d'une pompe qui aspire de l'eau et la refoule dans un circuit hydraulique, nous pouvons dire que le générateur fait circuler l'électricité dans le circuit en aspirant les électrons extérieurs libres par son pôle positif et en les refoulant par son pôle négatif.

**Le courant électrique dans un métal est un déplacement d'électrons (1).**

Il faut bien noter que la vitesse de déplacement d'ensemble des électrons reste faible (inférieure à 1 mètre par seconde), mais que la vitesse avec laquelle se transmet le mouvement des électrons est extrêmement élevée : de l'ordre de 200 000 km/s dans les conducteurs métalliques.

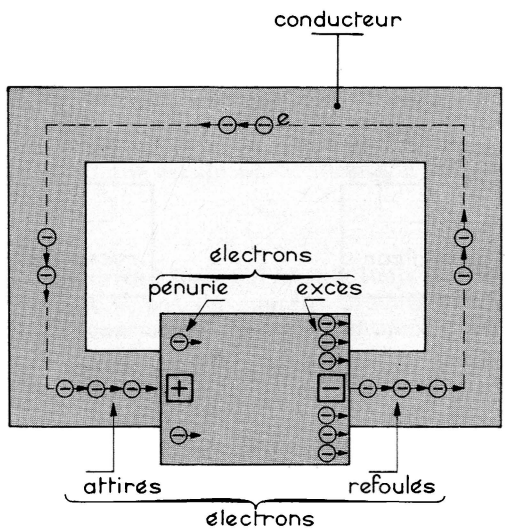



FIG. 6. — Le générateur crée :
— un excès d'électrons à son pôle négatif ;
— une pénurie ou raréfaction d'électrons à son pôle positif.

(1) Le courant dans les solutions conductrices (XIII § A 2) est un déplacement d'ions.

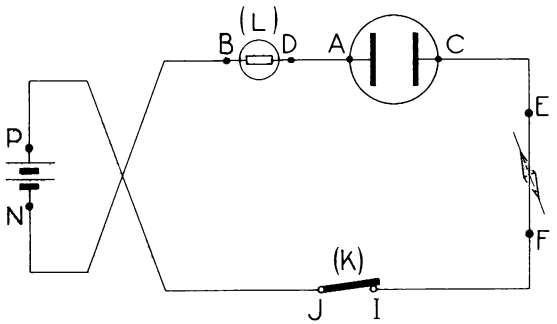



FIG. 7. — Un phénomène est *polarisé* quand il dépend du sens du courant.

On a conservé les notations de la figure 2, mais la lame A est devenue la cathode et la lame C : l'anode.

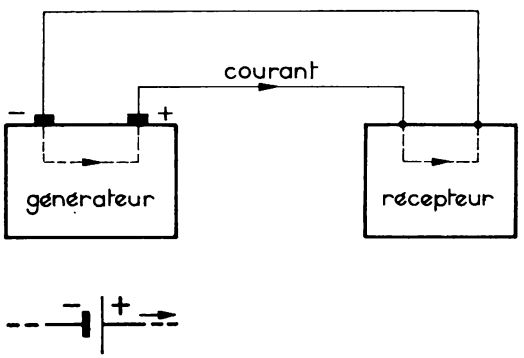



FIG. 8. — **Sens conventionnel du courant.**

Le courant va du pôle + (habituellement repéré en *rouge*) au pôle — (*noir*) à l'extérieur du générateur.

# C. — Sens du courant

## 1. — Le sens d'un courant électrique est défini conventionnellement.

Permutons les fils aboutissant aux bornes N et P dans la figure 2; cela conduit à relier J à P et B à N (fig. 7). Nous constatons que la lampe éclaire comme précédemment mais, dans la cuve à électrolyse, les dégagements d'hydrogène et d'oxygène sont inversés; le sens de déviation de la boussole est inversé.

Ces changements montrent que les bornes P et N de la batterie d'accumulateurs ont des propriétés différentes ; elles sont habituellement repérées par deux couleurs.

La borne *rouge* est appelée borne positive ou *pôle + (plus)* de l'accumulateur; la borne noire est la borne négative ou *pôle — (moins)*.

On convient de dire que le courant va de la borne positive à la borne négative dans la *partie du circuit extérieure* au générateur.

Le pôle — du générateur est celui qui est relié à l'électrode du voltamètre où apparaît l'hydrogène (et où, dans certaines électrolyses (1), se dépose le métal) : cette électrode est appelée ***cathode***; l'autre électrode est l'***anode***.

## 2. — Phénomènes polarisés; phénomènes non polarisés.

Lorsqu'on permute les fils connectant le circuit extérieur à la batterie, *on inverse le sens du courant* dans ce circuit.

*Un phénomène est dit* polarisé *lorsqu'il dépend du sens du courant.*

*Exemples :* électrolyse, effet magnétique.

Par contre, l'effet calorifique est un phénomène non polarisé.

REMARQUES.

1. Le courant est dit ***continu*** lorsqu'il circule toujours dans le même sens à partir du générateur : c'est le cas du courant produit par les accumulateurs, les piles, les générateurs tournants à courant continu.

2. Mais il existe une autre forme de courant dit courant ***alternatif*** parce que son sens s'inverse, en pratique un grand nombre de fois par seconde; la source la plus usuelle est le *secteur de distribution E. D. F.*; nous étudierons les propriétés du courant alternatif dans les fascicules III et IV.

3. Le sens *conventionnel* du courant est l'inverse du sens de déplacement réel des électrons : cela provient du fait que la théorie électronique est postérieure à la découverte et à l'utilisation du courant électrique dont le sens a été choisi arbitrairement.

---

(1) Voir leçon XIII § A.

# D. — Production du courant continu

En raison de l'importance considérable et toujours croissante de l'énergie électrique, nous donnons déjà quelques indications sur sa production et son transport.

## 1. — Sources de courant continu.

Ce sont : les piles (ch. XIV) et les accumulateurs (fig. 9 et ch. XIV) aux petites puissances ; aux moyennes puissances : grosses batteries d'accumulateurs et surtout génératrices tournantes (ou dynamos, fasc. II) entraînées par exemple par des moteurs Diesel.

Pour toutes les puissances, des plus petites aux plus grandes, le courant alternatif du réseau est transformé en courant continu par des appareils appelés *redresseurs*, qui conduisent le courant dans un seul sens (Fasc. III, p. 63).

Environ le tiers de l'énergie électrique produite en France par les centrales électriques est consommé sous forme de courant continu (électrochimie, électrométallurgie, traction...).

## 2. — L'énergie électrique est produite et transportée sous forme de courant alternatif.

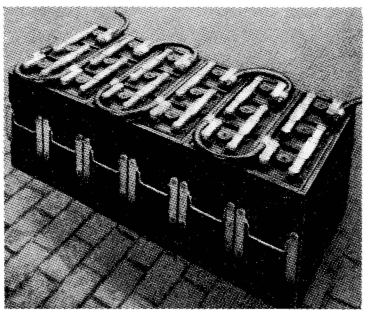


FIG. 9. — **Ensemble de batteries.** (*Document Tudor.*)

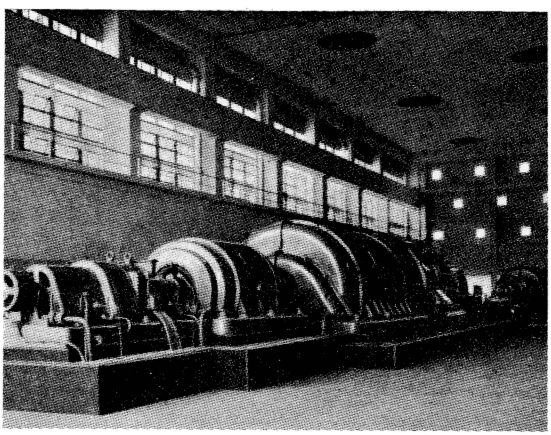


FIG. 10. — **Générateurs tournants de courant alternatif (alternateurs).**

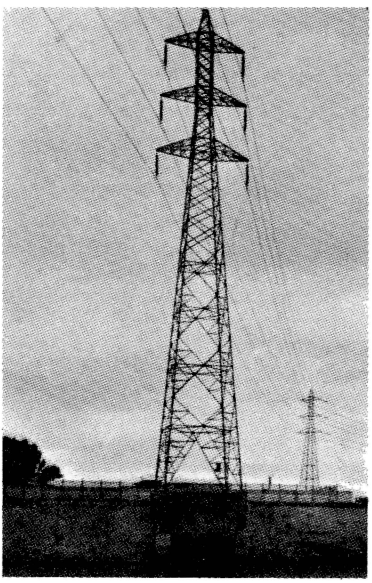


FIG. 11. — **Ligne de distribution aérienne.** (*Document E. D. F.*)

Un réseau national comporte :

— **Des centrales électriques** (fig. 10 et lecture ci-dessous).

— **Des lignes de distribution** (fig. 11) alimentées par les centrales à travers des *transformateurs*.

Elles peuvent être :

*a*) *aériennes*, constituées par des *câbles* de cuivre ou d'aluminium suspendus par des chaînes d'isolateurs en porcelaine ou en verre à des portiques métalliques, ou réalisées par des jeux de *barres* rigides (*feeders*) sur lesquelles sont branchés les appareils d'utilisation ;

*b*) *souterraines :* les conducteurs groupés, isolés entre eux, sont logés dans des tuyaux de plomb. La distribution se fait dans les bâtiments par des fils en nappe, protégés par des gaines en caoutchouc, répartis sous tube.

— **Des appareils auxiliaires :**

*a*) *De manœuvre*, tels que : *interrupteurs*, *contacteurs*, *sectionneurs* commandant l'ouverture ou la fermeture d'un récepteur ou de l'ensemble de l'installation.

*b*) *De sécurité*, interrompant le passage du courant en cas de fonctionnement anormal (fusibles, rupteurs thermiques, disjoncteurs...).

*c*) *De mesure:* soit de l'intensité du courant absorbé (ampèremètre), soit de l'énergie consommée (compteurs électriques).

### PROBLÈMES DE LA LEÇON IV

**1.** Dessiner un schéma électrique montrant le fonctionnement d'un commutateur inverseur placé entre un circuit d'utilisation et un générateur.

**2.** Sachant que la charge d'un électron est $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ coulomb, combien faut-il mettre en jeu d'électrons pour avoir une quantité d'électricité de 1 coulomb ?

**Réponse : $6{,}25 \cdot 10^{18}$ électrons.**

## LECTURE — Les centrales électriques

Les centrales électriques produisent de l'électricité au moyens d'**alternateurs** *entraînés par des appareils moteurs* utilisant différentes formes d'énergie ; les principaux types de centrales sont les suivants :

*a*) **Les centrales hydrauliques.**

Les alternateurs sont mus par des *turbines hydrauliques* à aubes (voir page 19), utilisant l'énergie cinétique d'une masse d'eau provenant de la retenue d'un barrage.

*b*) **Les centrales thermiques.**

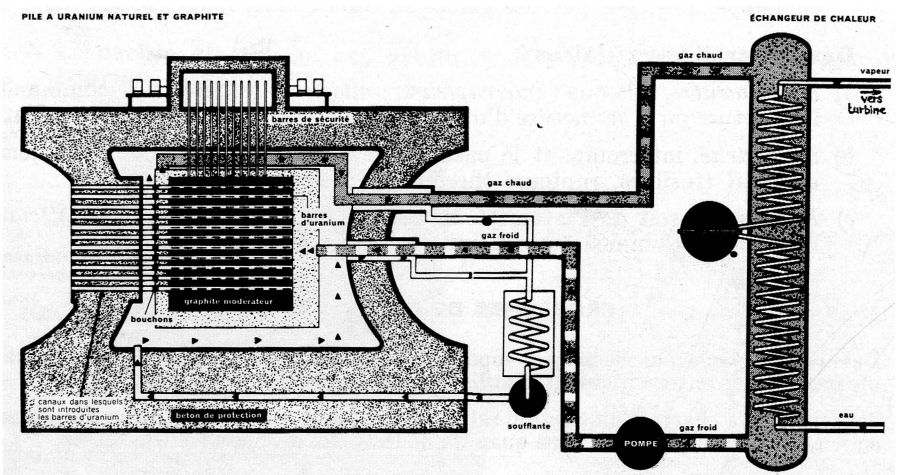
Les alternateurs sont mis en mouvement par des *turbines à vapeur*, à haute pression et resurchauffe, cette vapeur provenant de la combustion de charbon ou de gaz naturels.

### *c*) Les centrales nucléaires.

La chaleur dégagée par la *fission* de l'uranium dans un *réacteur* blindé est utilisée pour fournir de la vapeur qui actionne les turbines entraînant les alternateurs. Pour extraire la chaleur produite dans la pile atomique, on utilise un fluide sous forme de gaz (gaz carbonique, hélium) ou sous forme de liquide (eau naturelle, eau lourde...) (fig. 1).

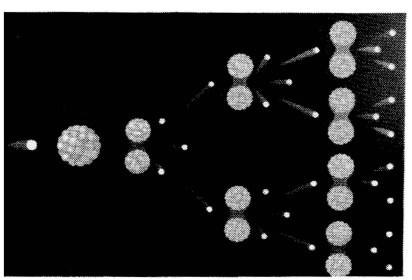
La fission s'opère par le bombardement d'un noyau d'uranium 235 par un neutron (à gauche sur la figure 2). Le neutron est absorbé pendant un temps très court, mais le noyau ainsi obtenu est instable et se scinde ; d'autres neutrons libérés par la fission provoquent à leur tour la fission d'autres noyaux : c'est la *réaction en chaîne.*

La construction des centrales nucléaires s'accélère dans tous les pays ; en France, elles produiront en 1980, l'équivalent de toute la production de l'E.D.F. en 1962.




Lecture FIG. 1. — **Réacteur atomique.**

*(Document Haut-Commissariat à l'Énergie Atomique.)*



*(Document Haut-Commissariat à l'Énergie Atomique.)*

Lecture FIG. 2. — **Fission et réaction en chaîne.**
La fission provoquée par un neutron émet deux ou trois neutrons qui peuvent provoquer, à leur tour, d'autres fissions.

# V. — INTENSITÉ D'UN COURANT

**MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL :**

— batterie d'accumulateurs de 3 éléments ;
— voltamètre avec électrodes de fer ;
— solution de soude ;
— éprouvettes ;
— interrupteur ;
— ampèremètre ;
— rhéostat.

## A. — Quantité d'électricité

### I. — UN COURANT TRANSPORTE UNE QUANTITÉ D'ÉLECTRICITÉ

*a*) **Expérience.**

Reprenons le voltamètre déjà utilisé pour observer l'effet chimique d'un courant et modifions-le de la manière suivante : de l'eau additionnée de soude remplit la cuve, les électrodes sont deux tiges de fer surmontées d'éprouvettes renversées et pleines de la solution (fig. 1).

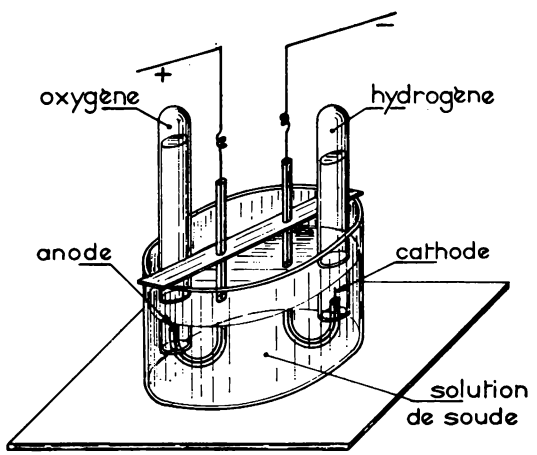



FIG. 1.

Dans un même circuit alimenté par une batterie d'accumulateurs, il est possible de monter *en série* deux à plusieurs voltamètres pouvant différer par leurs dimensions, leurs formes, les volumes de liquide (fig. 2). Fermons le circuit : aussitôt un dégagement gazeux se produit sur les électrodes et remplit peu à peu chaque éprouvette. Le gaz recueilli à la cathode s'enflamme en donnant une flamme bleue et en produisant une légère détonation : c'est de l'hydrogène ; le gaz recueilli à l'anode rallume une allumette qui s'éteint : c'est de l'oxygène.

Le courant ayant passé pendant un temps quelconque, nous constatons que *les volumes d'hydrogène recueillis aux différentes cathodes sont tous égaux.*

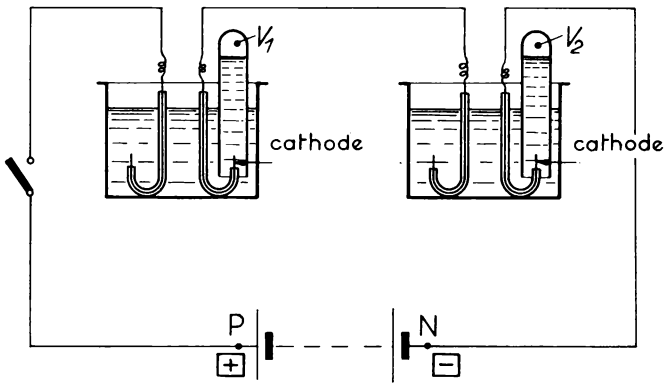



FIG. 2 : $V_1 = V_2$, les volumes recueillis aux deux cathodes, sont égaux : la même quantité d'électricité a traversé les deux voltamètres en série, c'est-à-dire montés à la suite l'un de l'autre et traversés par le même courant.

*b*) **Conclusion.**

L'effet chimique d'un courant :

— est le même en tous les points du circuit ;

— ne dépend que du courant et de la durée de son passage.

On explique ces faits en disant que *la même quantité d'électricité Q* a traversé les deux voltamètres et, plus généralement, toutes les sections du circuit ; ajoutons pour continuer l'interprétation électronique du courant de la leçon III, qu'un même nombre d'électrons a traversé toutes les sections du circuit. D'où la loi :

**La quantité d'électricité transportée par un courant pendant un temps donné est la même en tous les points d'un circuit simple (sans dérivations).**

## 2. — LA QUANTITÉ D'ÉLECTRICITÉ EST UNE GRANDEUR MESURABLE

Si dans une première expérience le volume d'hydrogène recueilli est $V$, il lui correspond une quantité d'électricité $Q$.

Si dans une seconde expérience, le volume d'hydrogène recueilli est 2 $V$, il lui correspond une quantité d'électricité 2 $Q$.

Les quantités d'électricité qui traversent le circuit sont proportionnelles aux volumes d'hydrogène recueillis sur les cathodes (fig. 3).

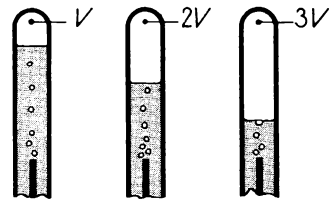



FIG. 3.

### 3. — L'UNITÉ DE QUANTITÉ D'ÉLECTRICITÉ EST LE COULOMB (1)

D'autres mesures ont montré que, dans l'électrolyse d'un sel, la quantité d'électricité est proportionnelle à la masse de métal déposé sur la cathode.

Aussi, les pesées étant plus précises que les mesures de volumes gazeux, l'unité de quantité d'électricité est définie de la manière suivante :

**Le *coulomb*** (symbole C) **est la quantité d'électricité qui, traversant un voltamètre à nitrate d'argent, dépose à la cathode 1,118 milligramme d'argent** (2).

$$1\ \text{C} \rightarrow 1{,}118\ \text{mg Ag}.$$

A 1,118 milligramme d'argent correspond $n = 6{,}25.10^{18}$ électrons (III, § C).

# B. — Intensité : définition ; mesure

### 1. — DÉFINITION

Pour comparer divers courants, il est nécessaire de considérer les *quantités d'électricité* qu'ils transportent *pendant un même temps*.

On dit de deux circuits dans lesquels se déposent, pendant le *même temps*, des *masses égales d'argent*, qu'ils sont parcourus par des courants de *même intensité* ; pendant ce temps, ces courants ont transporté la même quantité d'électricité. En particulier : *l'intensité d'un courant est constante* si les quantités d'électricité transportées par ce courant sont les mêmes pendant plusieurs intervalles de temps égaux. C'est pourquoi on pose la définition suivante :

*l'intensité d'un courant constant* est la quantité d'électricité qu'il transporte par seconde, soit $I = \frac{Q}{t}$.

---

(1) COULOMB (1736-1806). Savant français célèbre par les lois qu'il établit sur le magnétisme et l'électrostatique.

(2) Nous justifierons cette valeur dans la leçon XIII, § B, 3.

## 2. — UNITÉS

L'unité d'intensité est l'***ampère*** (1) (symbole A) : **c'est l'intensité d'un courant constant qui transporte 1 coulomb par seconde.**

$$\boxed{I = \frac{Q}{t}} \quad \begin{cases} I \text{ en ampère.} \\ Q \text{ en coulomb.} \\ t \text{ en seconde.} \end{cases}$$

Multiple : le *kiloampère* (k A) = 1 000 A ou $10^3$ A.
Sous-multiples usuels : le *milliampère* (mA) = 1/1 000 A ou $10^{-3}$ A.
le *microampère* ($\mu$A) = 1/1 000 000 A ou $10^{-6}$ A.

## 3. — MESURE

L'intensité d'un courant se mesure pratiquement avec un *ampèremètre.* C'est un appareil qui indique l'intensité du courant qui le traverse par simple lecture sur un cadran gradué devant lequel se déplace une aiguille (fig. 4) ; il est disposé en série dans le circuit (voir figure 5 qui indique son symbole graphique).

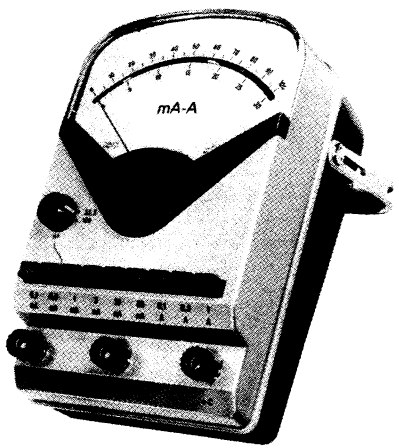



FIG. 4. — **Ampèremètre.**
*(Document Chauvin-Arnoux.)*

REMARQUE.

La plupart des ampèremètres utilisent les effets dits *magnétiques* du courant, comme principe de fonctionnement (voir fascicule II).

## 4. — ORDRE DE GRANDEURS DES INTENSITÉS DANS QUELQUES RÉCEPTEURS USUELS

| | |
|---|---|
| Lampe d'éclairage | : 0,1 à 5 A. |
| Radiateur électrique | : de quelques ampères à plusieurs dizaines d'ampères. |
| Moteurs de machines-outils | : de quelques ampères à 100 A. |
| Moteur de locomotive électrique | : 500 A. |
| Générateur de turbine | : 5 000 A. |

REMARQUE.

Pour un secteur de distribution donné, l'intensité augmente avec la puissance du récepteur.

---

(1) AMPÈRE (1775-1836). Savant français célèbre par ses travaux sur l'électromagnétisme et l'électrodynamique (voir fascicule II).

# C. — Propriétés de l'intensité

Au lieu de l'expression « intensité d'un courant », nous utiliserons dans la suite, et pour abréger, le terme « courant » ; par contre, le terme « ampérage » est à bannir et ne sera jamais utilisé.

## 1. — L'intensité d'un courant est la même en tous les points d'un circuit sans dérivation.

Nous montons comme l'indique la figure 6, en série :

— une batterie d'accumulateurs (1) ;

— un récepteur consistant en une lampe d'automobile ;

— deux ampèremètres.

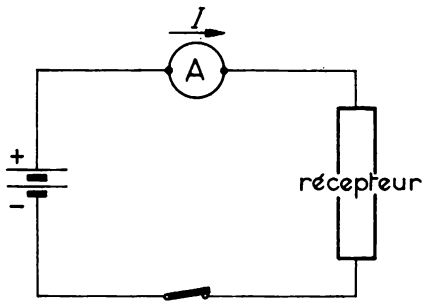



FIG. 5. — Symbole graphique d'un ampèremètre et montage, en série avec le générateur et le récepteur.

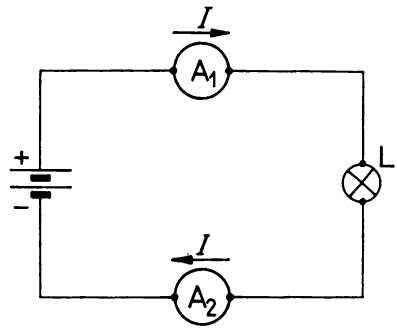



FIG. 6. — La déviation de l'aiguille de l'ampèremètre ne dépend pas de la position de l'appareil dans le circuit à mesurer.

Le circuit étant fermé, le courant traverse dans le sens de la flèche l'ampèremètre $A_1$, puis la lampe L, l'ampèremètre $A_2$, puis le générateur.

Les deux ampèremètres indiquent la même intensité : $I = 0{,}9$ ampère.

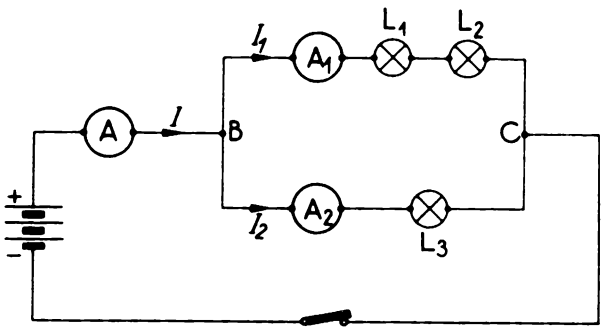
Ceci montre que l'intensité est la même tout le long du circuit, avant ou après le récepteur, comme le débit d'un cours d'eau est le même en amont ou en aval d'une turbine ; il en résulte qu'un *ampèremètre peut être placé en un point quelconque du circuit.*

REMARQUE.

Cette propriété découle de la nature même de l'électricité « qui ne s'accumule en aucun point d'un circuit ». Rappelons en outre (p. 44) que la même quantité d'électricité $Q$ passe, en un temps donné $t$ en tous les points du circuit série : le courant a donc partout la même intensité $I = \frac{Q}{t}$.

(1) Accumulateurs de 12 volts.

**2. — Quand un courant se partage entre plusieurs dérivations, le courant total est la somme des courants dérivés.**




La figure 7 nous montre le *circuit principal* (celui de l'ampèremètre A) se partageant aux points B et C entre deux circuits secondaires appelés *circuits dérivés :* celui des lampes $L_1$, $L_2$, celui de la lampe $L_3$ (1).
On dit aussi que ces deux circuits sont montés *en parallèle.*

FIG. 7. — Le courant total est la somme des courants dérivés.

L'ampèremètre A indique $I = 2{,}2$ ampères : c'est l'intensité du courant total.
L'ampèremètre $A_1$ marque $I_1 = 0{,}9$ ampère.
L'ampèremètre $A_2$ marque $I_2 = 1{,}3$ ampère.
Le courant total est la somme des courants dérivés ; on écrit :

$$\boxed{I = I_1 + I_2}$$

Cette propriété est valable quel que soit le nombre des dérivations.

REMARQUE 1.

Pour obtenir ce résultat précis, il a fallu régler au préalable le zéro de chacun des trois appareils ; avec trois ampèremètres quelconques, on trouve $I_1 + I_2$ un peu différent de $I$, mais la différence est inférieure aux incertitudes de lecture et de construction des ampèremètres.

REMARQUE 2.

Disposons, pendant un temps donné $t$, une cuve à électrolyse dans le circuit principal (volume d'hydrogène obtenu $V$) et deux autres dans les dérivations (volumes $V_1$ et $V_2$) ; on constate que $V = V_1 + V_2$. On en déduit $Q = Q_1 + Q_2$ et $\frac{Q}{t} = \frac{Q_1}{t} + \frac{Q_2}{t}$ c'est-à-dire $I = I_1 + I_2$.

# D. — L'ampère-heure

Le coulomb est une unité trop petite. Les durées réelles d'utilisation d'un courant à travers des récepteurs à usage industriel ou domestique se chiffrent en heures. L'ampère a permis de définir un multiple commode du coulomb : l'***ampère-heure***.

(1) Lampes utilisées : 15 watts-12 volts.

**L'ampère-heure est la quantité d'électricité transportée en 1 heure par un courant constant égal à 1 ampère.**

Ce courant transporte 1 coulomb par seconde, donc en 1 heure ou 3 600 secondes, il transporte 3 600 coulombs.

$$\boxed{1 \text{ ampère-heure} = 3\,600 \text{ coulombs.}}$$

La relation $Q = It$ s'applique donc avec deux systèmes d'unités :

$\boxed{Q = It}$ $\begin{cases} Q \text{ en coulomb} \\ I \text{ en ampère} \\ t \text{ en seconde} \end{cases}$ ou encore $\boxed{Q = It}$ $\begin{cases} Q \text{ en ampère-heure.} \\ I \text{ en ampère.} \\ t \text{ en heure.} \end{cases}$

Pratiquement on mesure les quantités d'électricité avec des compteurs dits « ampèreheuremètres ».

# E. — Exercices résolus

**1.** *Calculer la quantité d'électricité qui a traversé une cuve à électrolyse lorsqu'elle est alimentée par un courant de 5 ampères pendant 1 heure 30 minutes.*

**Solution.**

La quantité d'électricité est donnée par la relation :

$$Q = It. \text{ (C, A, s)}$$

Or $I = 5$ ampères et $t = 5\,400$ secondes, d'où :

$$Q = 5 \times 5\,400 = 27\,000 \text{ coulombs.}$$

**2.** *Le passage d'un courant continu dans une cuve à nitrate d'argent a produit un dépôt de 6,708 grammes en 10 minutes. Calculer :*

1° *La quantité d'électricité Q qui a traversé le circuit.*

2° *L'intensité I du courant.*

**Solution.**

1° 1 coulomb dépose 1,118 mg d'argent à la cathode du voltamètre, donc :

$$Q = \frac{m}{1{,}118} = \frac{6\,708}{1{,}118} = 6\,000 \text{ C.}$$

2° Intensité du courant : $I = \dfrac{Q}{t} = \dfrac{6\,000}{600} = 10$ A.

**3.** *Une lampe consommant 0,8 A, un radiateur absorbant 2 A et un moteur 1,2 A sont montés en dérivation aux bornes d'une même source et alimentés simultanément. Calculer le courant fourni par la source et la quantité d'électricité qu'elle débite pendant 2 h 30 mn.*

**Solution.**

Le courant fourni par la source est le courant principal ; il est égal à la somme des trois courants dérivés :

$$I = 0{,}8 + 2 + 1{,}2 = 4 \text{ A.}$$

La quantité d'électricité qui circulera en 2 h 30 mn = 9 000 secondes est :

$$Q = It = 4 \times 9\,000 = 36\,000 \text{ C,}$$

ou encore, puisque 1 Ah = 3 600 C :

$$Q = \frac{36\,000}{3\,600} = 10 \text{ Ah}$$

Plus directement, on aurait pu écrire :

$$\underset{(\text{Ah})}{Q} = \underset{(\text{A})\ (\text{h})}{It}$$

$$Q = 4 \times 2{,}5 = 10 \text{ Ah}.$$

## PROBLÈMES DE LA LEÇON V

**1.** Calculer la quantité d'électricité $Q$ qui a traversé un circuit parcouru par un courant $I = 10$ ampères pendant une durée $t = 2$ heures.

**Réponse : $Q = 72\,000$ C.**

**2.** Un courant $I = 25$ ampères traverse une cuve à électrolyse et la quantité correspondante d'électricité débitée est $Q = 96\,500$ coulombs ; calculer le temps $t$ nécessaire à l'opération.

**Réponse : $t = 1$ h 4 mn 20 s.**

**3.** Un circuit électrique est traversé pendant 2 heures 30 minutes par un courant d'intensité $I = 6$ ampères. Exprimer la quantité d'électricité $Q$ débitée en ampères-heures et en coulombs.

**Réponse : $Q = 15$ Ah ou 54 000 C.**

**4.** On recueille 0,10 gramme d'argent en 3 minutes à la cathode d'un voltamètre à nitrate d'argent. Déterminer :
*a*) La quantité d'électricité $Q$ ayant traversé le voltamètre.
*b*) L'intensité $I$ du courant débité.

**Réponses : a) $Q = 89{,}5$ C ; b) $I = 0{,}50$ A.**

**5.** En un quart d'heure, une lampe à incandescence est traversée par 900 coulombs et consomme une énergie $W = 72\,000$ joules.
Donner pour 1 heure de fonctionnement :
*a*) L'énergie consommée $W$ en wattheures.
*b*) La quantité $Q$ d'électricité débitée en ampères-heures.

**Réponses : a) $W = 80$ Wh ; b) $Q = 1$ Ah.**

**6.** Une batterie d'accumulateurs pour automobile peut fournir une quantité d'électricité $Q = 100$ ampères-heures. Elle a débité un courant constant $I = 8$ ampères pendant 6 heures 15 minutes. Calculer le temps $t$ de fonctionnement encore disponible pour une même intensité.

**Réponses : $t = 6$ h 15 mn ; la batterie est à la moitié de ses possibilités.**

**7.** Déchargée en 8 heures 30 minutes, une batterie d'accumulateurs restitue 90 % de la quantité d'électricité qu'elle reçoit quand on la charge en 10 heures. Calculer les intensités des courants de décharge et de charge sachant que la capacité de la batterie est 135 ampères-heures.

*(Examen C. A. P.)*

**Réponses : $I_d \approx 15{,}9$ A ; $I_c = 15$ A.**

# VI. — LOI DE JOULE. RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE

**MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL :**

— batterie de 12 volts ;
— fil de cuivre de 50 cm de longueur ;
— fil de fer de 50 cm de longueur ;
— 3 lampes à filament 12 V ;
— calorimètre et accessoires ;
— 300 g de pétrole ;
— rhéostat ;
— résistance chauffante de 5 ohms ;
— ampèremètre magnétoélectrique 0,5 A ;
— ampèremètre thermique de démonstration ;
— fusibles ;
— thermostat à bilame.

## A. — Observations

### 1. — Le passage d'un courant électrique dans un conducteur s'accompagne d'un dégagement de chaleur.

Cet *effet thermique* du courant appelé encore ***effet Joule*** a pu être facilement observé par chacun de nous : les radiateurs et cuisinières électriques, les fers à repasser, etc., sont des exemples familiers de récepteurs dans lesquels l'énergie électrique reçue est totalement transformée en énergie calorifique.

Nous noterons aussi que l'effet thermique du courant est inévitable ; ainsi, dans un moteur électrique dont le rôle est la transformation d'énergie électrique en énergie mécanique, il y a dissipation sous forme de chaleur d'une partie de l'énergie absorbée par le moteur. Dans ce cas, l'énergie électrique transformée en chaleur constitue une perte.

### 2. — La quantité de chaleur produite par un courant dépend de trois facteurs :

a) *De la durée de passage du courant.*

Ainsi, par exemple, un fer à repasser branché n'atteint pas immédiatement une température permettant de l'utiliser : ce n'est qu'au bout de quelques minutes qu'il peut efficacement remplir sa fonction.

b) *De l'intensité du courant.*
Les jeux de lumière dans les théâtres (rampes à éclairage progressif) s'obtiennent en faisant varier l'intensité dans les lampes ; reproduisons cet effet (fig. 1 *a* et *b*) au moyen d'une lampe et à l'aide d'un appareil appelé **rhéostat.**

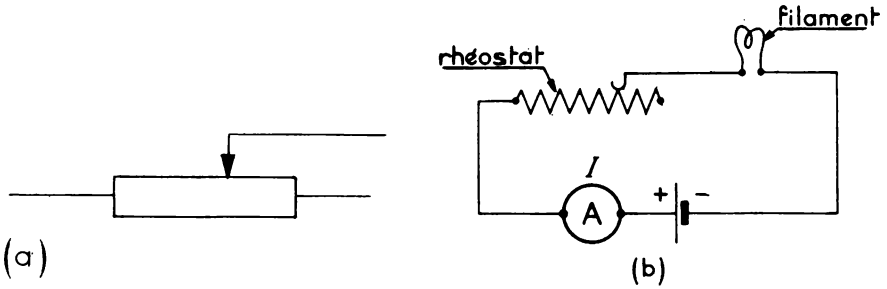



FIG. 1. — Un rhéostat est un appareil qui permet d'introduire une longueur variable de fil dans un circuit : il permet donc de régler l'intensité *I* du courant (fig. *b*).
La figure (*a*) donne la représentation normalisée actuelle ; nous utiliserons parfois l'ancienne représentation, plus explicite.

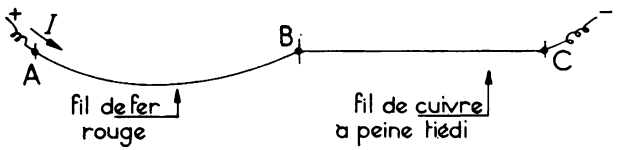



FIG. 2. — Pour un même courant, l'effet calorifique est plus important dans le fer que dans le cuivre.

c) *De la nature et des dimensions du conducteur.*
Prenons deux fils de même longueur et de même diamètre, l'un en fer, l'autre en cuivre et disposons-les en série dans un même circuit (fig. 2) ; nous observons que le premier rougit tandis que le second reste tiède. Placé dans les mêmes conditions, le fer dégage plus de chaleur que le cuivre.

De même, nous avons pu observer que les appareils modernes, tels que radiateurs, cuisinières... possèdent généralement plusieurs « allures de chauffe » : soit la marche en veilleuse, soit la marche à demi ou à plein régime ; on peut ainsi, suivant les besoins, régler le chauffage en modifiant le nombre des fils chauffants ou leur mode d'association à l'aide d'un commutateur (X, § B, C).

# B. — Mesures

Considérons le montage suivant (fig. 3 *a*) ; il nous permet de préciser quantitativement l'effet de chacun des facteurs :

Un fil chauffant est immergé dans un calorimètre (fig. 3 *b*) contenant 300 grammes de pétrole ; il est parcouru par un courant fourni par une batterie d'accumulateurs de 12 volts et réglable à l'aide d'un rhéostat. Un ampèremètre

mesure l'intensité, un chronomètre le temps de passage du courant ; un thermomètre marque la température du pétrole, un autre la température ambiante.

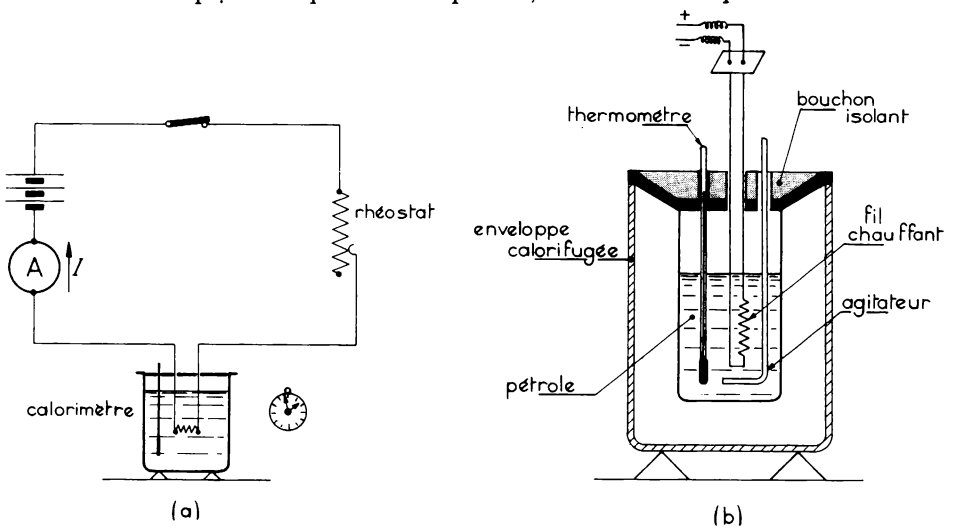



FIG. 3. — *a*) Montage expérimental permettant la mesure de l'effet Joule. *b*) Calorimètre et accessoires.

### 1. — La quantité de chaleur dégagée est proportionnelle à la durée de passage du courant.

Faisons passer un courant constant $I = 1{,}5$ A et notons l'indication du thermomètre toutes les 2 minutes.

| Intensité constante $I = 1{,}5$ A | | Température initiale du pétrole $\theta_i = 19{,}9$ °C | | Température ambiante de la salle $\theta_a = 21{,}9$ °C |
|---|---|---|---|---|
| Temps de passage du courant $t$ (minutes) | Température du pétrole $\theta$ (° C) | Élévation de température du pétrole $\Delta\theta$ (° C) | Quantité de chaleur dissipée $q = mc\,\Delta\theta$ (cal) | Énergie $W = 4{,}18\,q$ (J) |
| 0 | 19,9 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 22 | 2,1 | 315 | 1 317 |
| 4 | 24,1 | 4,2 = 2,1 × 2 | 630 | 2 633 |
| 6 | 26,2 | 6,3 = 2,1 × 3 | 945 | 3 950 |

On constate que pour une intensité constante, l'élévation de température — et par conséquent la quantité de chaleur dégagée — sont proportionnelles au temps.

**2. — La quantité de chaleur dégagée est proportionnelle au carré de l'intensité I du courant.**

Même montage, même fil chauffant, même durée de passage du courant, mais nous opérons avec des intensités différentes : par exemple pendant 2 minutes, un courant de 0,5 ampère, puis pendant le même temps un courant de 1 ampère, puis de 1,5 et de 2 ampères, ces valeurs successives étant obtenues en manœuvrant le rhéostat.

Nous relevons les élévations de températures correspondantes, résumées dans le tableau suivant :

| Temps de passage du courant $t = 2$ minutes | | Température initiale du pétrole $\theta_i = 17{,}9$ °C | Température de la salle $\theta_a = 21{,}5$ °C |
|---|---|---|---|
| Intensités $I$ (A) | Températures initiales $\theta_i$ (°C) | Températures finales $\theta_f$ (°C) | Élévation de température $\Delta\theta$ (°C) |
| 0,5 | 17,9 | 18,2 | 0,3 |
| 1 | 18,2 | 19,4 | 1,2 |
| 1,5 | 19,4 | 21,7 | 2,3 |
| 2 | 21,7 | 25,9 | 4,2 |

A 0,5 ampère correspond une élévation de température 0,3 °C.

A 1 ampère correspond une élévation de température 1,2 °C.

On constate que lorsque l'intensité *double* (0,5 A à 1 A), l'élévation de température *quadruple*.

Sous une autre forme, exprimons, pour les valeurs successives de $I$, le rapport $\frac{\Delta\theta}{I^2}$ :

$$\frac{0{,}3}{0{,}5^2} = 1{,}2 \; ; \qquad \frac{1{,}2}{1^2} = 1{,}2 \; ; \qquad \frac{2{,}3}{1{,}5^2} = 1{,}02 \; ; \qquad \frac{4{,}2}{2^2} = 1{,}05.$$

Ce rapport est le même (1,2) pour $I = 0{,}5$ A et $I = 1$ A, bien que le courant ait doublé ; légèrement inférieur à cette valeur pour les deux valeurs suivantes parce que le calorimètre avait dépassé la température de la salle, d'où des pertes de chaleur. En utilisant comme calorimètre un vase Dewar, on trouve bien 1,2 dans les deux derniers cas.

En conclusion : *l'énergie dissipée par effet Joule est proportionnelle au carré de l'intensité.*

### 3. — La quantité de chaleur dégagée dépend du conducteur utilisé.

En reprenant les mesures faites dans les conditions d'expérience des paragraphes 1 et 2, mais avec des fils conducteurs de natures différentes, traversés par le même courant pendant le même temps, nous constatons :

— que l'élévation de température est proportionnelle à la durée de passage du courant ;
— que les élévations de température, pour une même durée, sont devenues différentes.

### 4. — Loi de Joule (1). Résistance électrique.

Les expériences ci-dessus montrent que l'énergie thermique $W$ dissipée dans le conducteur est proportionnelle à la durée du courant et au carré de son intensité ; on a donc :

$$W = RI^2t$$

où $R$ est un facteur qui ne dépend que du conducteur (nature, dimensions, température) ; $R$ est appelé **résistance électrique du conducteur.**

D'où la loi de Joule :

> L'énergie électrique dissipée en chaleur dans un conducteur est *proportionnelle :*
> — *à la résistance de ce conducteur ;*
> — *au carré de l'intensité du courant qui le parcourt ;*
> — *à la durée de passage du courant.*

REMARQUE.

Physiquement, le courant se traduisant par un déplacement d'électrons, chaque conducteur freine plus ou moins, suivant sa propre structure moléculaire, le passage du courant, entraînant une élévation de température ; c'est cette résistance au passage du courant que traduit le coefficient $R$.

### 5. — Unité de résistance électrique : ohm.

*a*) **L'unité de résistance est l'*ohm*** (symbole Ω : que l'on prononce *oméga*) : D'après la loi de Joule :

$$R = \frac{W}{I^2t}.$$

Pour $W = 1$ joule, $I = 1$ ampère et $t = 1$ seconde, on trouve $R = 1$, donc :

**L'ohm est la résistance électrique d'un conducteur qui, traversé par un courant de 1 ampère pendant 1 seconde, dissipe sous forme de chaleur une énergie électrique de 1 joule.**

---

(1) JOULE (1818-1889). Physicien anglais connu par ses travaux sur l'échauffement des conducteurs parcourus par un courant et sur la thermodynamique des gaz.

On a donc :

$$\boxed{W = RI^2t}$$

$W$ en joule (J).
$R$ en ohm (Ω).
$I$ en ampère (A).
$t$ en seconde (s).

Multiples usuels : le *kiloohm* (kΩ) : 1 000 Ω ou $10^3$ Ω.
le *mégohm* (MΩ) : 1 000 000 Ω ou $10^6$ Ω.
Sous-multiple usuel : le *microhm* (μΩ) : 1/1 000 000 Ω ou $10^{-6}$ Ω.

b) *Valeur de la résistance déduite des expériences* (§ B1 et B2) :

| Temps de passage $t$ (minutes) | Énergie dissipée $W$ (J) | Résistance $R = \frac{W}{I^2t}$ (Ω) |
|---|---|---|
| 2 | 1 317 | $\frac{1\,317}{1{,}5^2 \times 60 \times 2} \simeq 4{,}89 \approx 4{,}9$ |
| 4 | 2 633 | $\frac{2\,633}{1{,}5^2 \times 60 \times 4} \approx 4{,}88 \approx 4{,}9$ |
| 6 | 3 950 | $\frac{3\,950}{1{,}5^2 \times 60 \times 6} \approx 4{,}88 \approx 4{,}9$ |

Or la résistance utilisée est marquée 5 ohms, avec une tolérance de fabrication de 5 %, c'est-à-dire une incertitude de :

$$5 \times 0{,}05 = 0{,}25\,\Omega < 0{,}3\,\Omega,$$

cette résistance est comprise entre 4,7 Ω et 5,3 Ω. Notre mesure, 4,9 Ω, *utilisant la loi de Joule*, est bien comprise entre ces deux limites.

# C. — Autres expressions de la loi de Joule

## 1. — Puissance dissipée en chaleur dans une résistance R (fig. 4).

On sait que (chap. I) :

$$W = Pt$$

(énergie = puissance × temps)

La loi de Joule s'exprime donc par la puissance $P$ dépensée en chaleur :

$$P_J = \frac{W}{t} = \frac{RI^2t}{t}$$

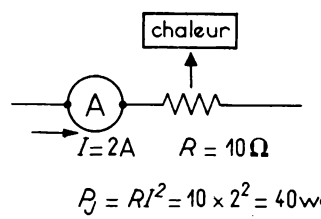



FIG. 4. — La puissance électrique dissipée en chaleur est égale au produit de la résistance par le carré de l'intensité.

soit $\boxed{P_J = RI^2}$ $\begin{cases} P_J \text{ en watt.} \\ R \text{ en ohm.} \\ I \text{ en ampère.} \end{cases}$

*La puissance dégagée sous forme de chaleur dans un conducteur est égale au produit de sa résistance par le carré du courant qui le traverse.*

### 2. — Quantité de chaleur dissipée par effet Joule.

Rappelons que (II, § B, 2) :

$$1 \text{ calorie} = 4{,}18 \text{ joules.}$$

L'énergie $W = RI^2t$ correspond donc à la quantité de chaleur :

$$q = \frac{W}{4{,}18},$$

soit $\boxed{q = \frac{RI^2t}{4{,}18} = 0{,}24\ RI^2t}$ $\begin{cases} q \text{ en calorie.} \\ R \text{ en ohm.} \\ I \text{ en ampère.} \\ t \text{ en seconde.} \end{cases}$

REMARQUE. — Avec plus de précision, 1 calorie = 4,185 joules et $\frac{1}{4{,}185} = 0{,}237$.

# D. — Conséquences pratiques de l'effet Joule

### 1. L'effet Joule présente des effets nuisibles.

a) *L'échauffement des machines électriques* limite leur puissance et diminue leur rendement.

La partie d'énergie électrique transformée en chaleur dans un moteur électrique ou dissipée dans une ligne de transport, échappe dans le premier cas à la transformation en énergie mécanique et dans le second cas à l'énergie à transporter : elle constitue des **pertes**.

Ces pertes diminuent le rendement des appareils, causent un échauffement qui, s'il devient excessif, détériore les isolants.

Pour les limiter, il faut réduire la résistance des conducteurs et l'intensité du courant (mais il faut, en contrepartie, augmenter la tension — *voir* leçon suivante — pour conserver la même puissance) (1).

Dans certaines réalisations, les constructeurs voulant obtenir des puissances améliorées sans accroître le dimensionnement des machines, munissent celles-ci de dispositifs de *refroidissement :* ventilateurs pour les machines tournantes, cuves remplies d'huile avec ailettes de refroidissement pour les transformateurs.

(1) Les transports d'énergie électrique à grande distance se font, pour cette raison, sous des tensions élevées, de l'ordre de quelques centaines de kilovolts pour des courants limités à quelques centaines d'ampères.

b) *Le court-circuit est une cause de détérioration, souvent d'incendie.*

Il y a *court-circuit* quand deux conducteurs de résistance négligeable, et reliés à un générateur, viennent en contact (fig. 5). Le courant atteint instantanément une intensité très importante. Les conducteurs sont chauffés au rouge et peuvent fondre; les matières isolantes combustibles s'enflamment.

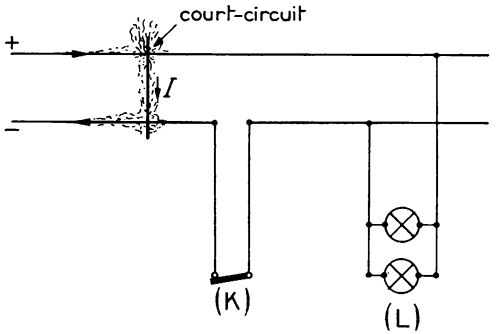



FIG. 5. — La barre court-circuite le générateur.

*Les mauvais contacts sont une cause d'échauffement.*

Lorsque deux points d'un appareil électrique parcouru par un courant ont une liaison imparfaite (bornes mal serrées, fils mal reliés...), il y a mauvais contact et la résistance — dite *résistance de contact* — est grande; l'échauffement entre les deux points devient suffisamment important pour détériorer peu à peu l'appareil.

c) *Limitation du courant dans les conducteurs: densité de courant.*

Pour éviter un échauffement excessif dans les conducteurs ou pour le limiter à une valeur de sécurité, variable suivant les emplois, on limite dans les conducteurs la *densité* de courant.

La densité de courant dans un fil conducteur est égale au quotient de l'intensité $I$ par l'aire $s$ de la section droite du conducteur. Elle s'exprime usuellement en ampère par millimètre carré :

$$J = \frac{I}{s}$$

$J$ en A/mm²
$I$ en A
$s$ en mm²

La densité de courant admissible est variable avec la nature et la section du fil, les conditions de refroidissement, la température ambiante.

Elle est de l'ordre de quelques A/mm² pour des conducteurs de cuivre ou d'aluminium (1).

**2° L'effet Joule a d'importantes applications.**

a) *Le chauffage électrique.*

Les radiateurs électriques comportent une résistance chauffante, constituée d'un fil de nickel chrome par exemple, enroulé sur un support réfractaire; lorsque le courant la traverse, elle rougit et constitue une source de chaleur.

(1) Référ. : *Technologie d'électricité*, tome I, par HEINY et CAPLIEZ (Édit. Foucher).

Le fil chauffant peut n'être pas visible ; c'est le cas des fers à repasser dont le fil résistant est enroulé sur une plaque d'amiante, isolée par deux feuilles de mica (fig. 6).

La résistance chauffante peut être blindée (fig. 7). Le fil résistant conducteur est enroulé en hélice et placé dans un tube métallique rempli de magnésie comprimée qui conduit la chaleur et non l'électricité ; les extrémités du tube sont bouchées par une matière isolante ; ce genre de résistance sert de thermoplongeurs pour chauffer de l'eau ; il est utilisé dans les chauffe-eau à accumulation (fig. 8).

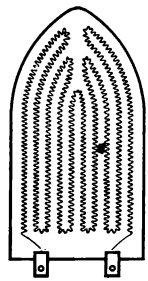


FIG. 6. — **Éléments de la résistance chauffante.**
*(Document Calor.)*

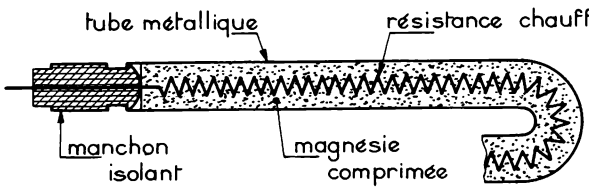



FIG. 7. — **Résistance blindée schématisée.**

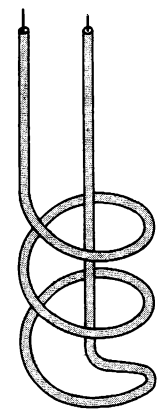


FIG. 8. — **Thermoplongeur.**

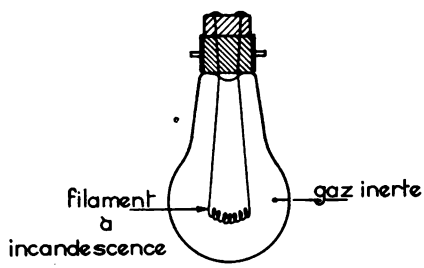



FIG. 9. — **Lampe à incandescence.**

b) *L'éclairage par incandescence.*

Un filament métallique porté à une température suffisante émet de la lumière blanche ; les lampes modernes comportent un filament de tungstène capable de supporter jusqu'à 2 600° C sans risque de fusion dans une enceinte de gaz inerte (krypton, azote, argon) (fig. 9).

c) *Le coupe-circuit fusible* (fig. 10).

C'est un appareil simple fait de quelques centimètres de fil (en alliage plomb-étain, aluminium, argent) que l'on intercale dans le circuit ; lorsque le courant est normal, la température est inférieure à la température de fusion du fil ; si le courant devient trop grand, le fusible fond, le circuit est coupé. Les fusibles *calibrés* ont des dimensions prédéterminées pour qu'ils fondent pour une intensité limite de courant.

d) *Le thermostat à bilame.*

Deux lames de métaux différents sont soudées sur toute leur surface, l'une contre l'autre et constituent une bilame ; l'un des métaux est à grande dilatabilité, l'autre à dilatabilité presque nulle. Quand la température s'élève, la bilame se courbe, tournant sa face concave du côté de moindre dilatabilité (fig. 11). Quand la température revient à sa valeur initiale, la bilame retrouve sa forme. Ce principe est retenu dans les thermostats pour ouvrir puis refermer un contact (fig. 12) et régler ainsi la température d'un liquide, d'une enceinte, ou assurer la sécurité d'une installation.

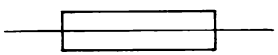


FIG. 10.
**Fusible** : symbole graphique.

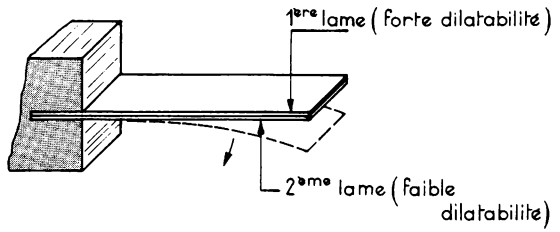



FIG. 11. — **Bilame** : la bilame chauffée se courbe, la concavité étant du côté de la face de moindre dilatabilité.

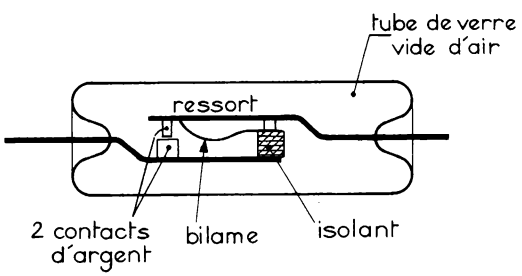



FIG. 12. — **Thermostat à bilame pour relais** : la bilame chauffée soulève le ressort et interrompt le circuit.

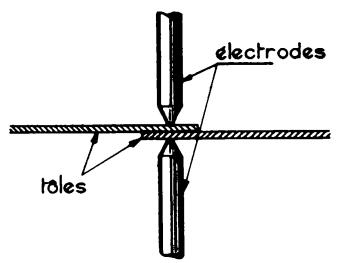



FIG. 13. — **Soudure électrique.** Principe : un courant très intense, passant de l'une à l'autre électrode, fond le métal au point de contact et réalise une soudure entre les deux tôles juxtaposées.

e) *La soudure électrique par points* (fig. 13).

Un fort courant traverse, pendant une fraction de seconde, deux tiges conductrices entre lesquelles on serre fortement deux tôles à souder. Les tôles, chauffées à blanc au point de contact, se soudent. Dans les machines à souder puissantes (industrie automobile...), les courants sont de dizaines de milliers d'ampères ; de telles machines sont alimentées par le réseau triphasé (Fasc. IV).

f) *L'ampèremètre thermique.*

Un fil conducteur est maintenu tendu entre deux points sous l'action d'un ressort ; lorsqu'il est parcouru par un courant, il s'échauffe et se dilate ; une aiguille solidaire du ressort et du fil se déplace devant un cadran gradué (fig. 14). Ces appareils à dilatation de fil sont maintenant remplacés par des appareils à *thermocouple* (1).

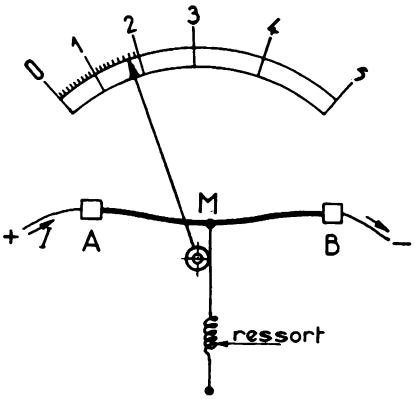



FIG. 14. — **Ampèremètre thermique.** Le fil AB se dilate en fonction du courant qui le traverse. Le point M relié à un ressort se déplace et transmet son mouvement à l'aiguille par l'intermédiaire d'une poulie.

# E. — Exercices résolus

**1.** *Un chauffe-eau dont la résistance chauffante est de 10 ohms est plongé dans un ballon de 100 litres d'eau ; la température de l'eau étant 15 °C, on veut la porter à 65 °C en 1/4 d'heure. Quelle est l'intensité nécessaire?*

**Solution.**

Il faut fournir, pour une élévation de 50 °C de la température de l'eau :

$$q = 100\,000 \times 50 = 5\,000\,000 \text{ calories.}$$

La deuxième forme de la loi de Joule nous donne :

$$q = 0{,}24\ RI^2 t.$$

On a donc :

$$I^2 = \frac{q}{0{,}24\ \text{R} \cdot \text{t}} = \frac{5\,000\,000}{0{,}24 \times 10 \times 900} = \frac{5\,000}{0{,}24 \times 9} = 2\,315\ \text{A}^2$$

d'où : $I = \sqrt{2\,315} = 48{,}1 \approx 48$ A.

**2.** *Un conducteur métallique de 1 millimètre de diamètre dont la résistance est 25 ohms dissipe en 20 minutes une énergie de 360 000 joules sous forme de chaleur ; on demande :*

a) *La puissance dissipée par effet Joule.*

b) *La densité de courant.*

**Solution.**

*a*) Puissance $$P = \frac{W}{t} = \frac{360\,000}{20 \times 60} = 300 \text{ W.}$$

*b*) Puisque la puissance dissipée par effet Joule est $P = RI^2$, nous avons :

$$I^2 = \frac{P}{R} = \frac{300}{25} = 12\ \text{A}^2$$

(1) *Lecture technique*, p. 159.

d'où $I = \sqrt{12} = 2\sqrt{3} \approx 3{,}46$ A.

Densité : $J = \dfrac{I}{s} = \dfrac{3{,}46}{\frac{\pi}{4}\left(\frac{10}{10}\right)^2} = \dfrac{3{,}46 \times 4}{3{,}14} \approx 4{,}4$ A/mm².

**3.** *Sachant qu'une lampe dont la résistance est 200 ohms absorbe une puissance 144 watts, trouver l'intensité du courant dans le filament.*

**Solution.**

La puissance dissipée est entièrement calorifique ; on a donc :

$$P = RI^2$$

d'où nous tirons :

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}}$$

soit : $I = \sqrt{\dfrac{144}{200}} \approx 0{,}85$ A.

## PROBLÈMES DE LA LEÇON VI

**1.** Une lampe à incandescence a pour résistance $R = 300$ ohms et absorbe une puissance $P = 75$ watts. Calculer l'intensité $I$ du courant qui traverse le filament.

**Réponse : $I = 0{,}50$ A.**

**2.** Un radiateur, de résistance $R = 10$ ohms, est parcouru par un courant $I = 8$ ampères. Quelle est, en kilocalories, la quantité de chaleur $q$ dégagée en 15 minutes ?

**Réponse : $q \approx 138$ kcal.**

**3.** Une résistance $R = 20{,}9$ ohms plonge dans un récipient contenant 1 000 grammes de pétrole à la température $\theta = 10$ °C. Elle est parcourue par un courant $I = 3$ ampères. Calculer le temps $t$ nécessaire pour porter le pétrole à 100 °C en admettant que toute la chaleur est utilisée à cet effet. On rappelle que la chaleur massique du pétrole est 0,5 cal/g/degré.

**Réponse : $t = 16$ mn 40 s.**

**4.** Un récipient calorifugé est réalisé en aluminium, de chaleur massique 0,2 cal/g/degré et pèse, vide, 250 grammes ; il est utilisé en calorimètre et rempli de 1 litre d'eau à 20 °C, dans lequel on plonge une résistance chauffante $R = 25$ ohms.
Calculer, en négligeant les pertes de chaleur, l'intensité $I$ du courant nécessaire pour porter l'eau à la température d'ébullition en 10 minutes.

**Réponse : $I = 4{,}8$ A.**

**5.** Sachant que :

— la puissance dissipée par un conducteur est donnée par la relation $P_u = kS\Delta\theta$ dans laquelle $k$ est le coefficient de rayonnement (nombre de watts perdus par mètre carré de surface du conducteur), $S$ la surface de rayonnement (ou de refroidissement) en mètres carrés, $\Delta\theta$ l'échauffement en degrés Celsius ;

— la température maximale admissible est de 60 °C pour un conducteur en cuivre isolé au caoutchouc vulcanisé travaillant en service continu pour une température ambiante de 30 °C (1) ;

1° Quelle est la valeur du coefficient $k$ de rayonnement d'un conducteur de même catégorie ayant une longueur $l = 3$ mètres, un diamètre $d = 3{,}2$ millimètres et une résistance $R = 0{,}005$ ohm pour que la température d'équilibre soit maintenue lorsque ce conducteur est parcouru par un courant $I = 40$ ampères ?

2° Quelle serait la température atteinte si ce conducteur était parcouru par un courant de 50 ampères ?

**Réponses : 1° $k \approx 8{,}3$ W/m²; 2° $\theta' = 76{,}8 \approx 77°$.**

**6.** Un courant rectangulaire $i$ existe pendant 10 millisecondes, est interrompu pendant le même temps, existe de nouveau, etc. Pendant sa durée, il est constant et vaut $I_M = 2$ ampères (figure Pb 6) :

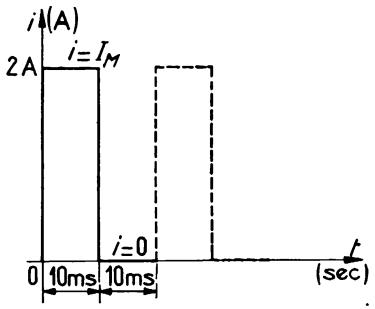



FIG. Pb 6.

1° Quelle est l'intensité moyenne $I_{moy}$ du courant rectangulaire ?

2° Quelle est l'énergie $W$ fournie par ce même courant traversant, pendant 20 millisecondes, une résistance d'utilisation $R = 10$ ohms ?

3° L'intensité du courant continu qui produirait, dans la même résistance, la même énergie que le courant rectangulaire donné, pendant le même temps, est appelée intensité efficace $I_{eff}$ : calculer l'intensité efficace du courant rectangulaire.

**Réponses : 1° $I_{moy} = 1$ A; 2° $W = 0{,}4$ J; 3° $I_{eff} = 1{,}41$ A.**

NOTA. — *Pour résoudre les exercices 6 et 7, on utilisera les définitions suivantes :*

— L'intensité moyenne $I_{moy}$ *du courant variable* i *est l'intensité du courant continu constant qui transporterait, pendant le même temps, la même quantité d'électricité que* i.

— L'intensité efficace $I_{eff}$ *du courant variable* i *est l'intensité du courant continu constant qui fournirait, pendant le même temps, la même énergie que* i *à la même résistance.*

(1) Référ. : *Technologie d'électricité*, tome I, par HEINY et CAPLIEZ (Édit. Foucher).

**7.** Un courant rectangulaire $i$ existe pendant 10 millisecondes et a pour valeur constante $I_M = 2$ ampères, puis s'inverse pendant à nouveau 10 millisecondes et a pour valeur constante $I'_M = 1$ ampère, etc., le courant $i$ se reproduisant périodiquement.

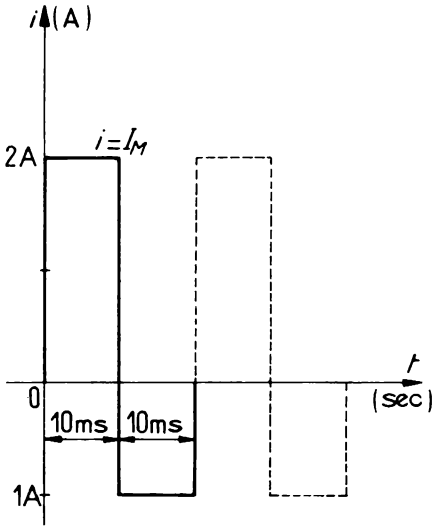



FIG. Pb 7.

1° Quelle est la valeur de l'intensité moyenne $I_{moy}$ du courant rectangulaire ?

2° Quelle est l'énergie $W$ fournie par ce même courant traversant, pendant 20 millisecondes, une résistance d'utilisation $R = 10$ ohms ?

3° Quelle est la valeur de l'intensité efficace $I_{eff}$ ?

**Réponses : 1° $I_{moy} = 0{,}5$ A ; 2° $W = 0{,}5$ J ; $I_{eff} = 1{,}58$ A.**

# VII. — TENSION ÉLECTRIQUE (ou différence de potentiel)

**MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL :**

— accumulateurs 12 volts ;
— voltamètre à eau acidulée ;
— éprouvettes ;
— 3 voltmètres ;
— ampèremètre ;
— récepteur simple (résistance) ;
— lampe sur support ;
— fil nickel chrome de 1 m, ⌀ 51/100 ;
— résistance en constantan de 2,7 ohms.

## A. — Définitions

### I. — UN RÉCEPTEUR TRANSFORME L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DU GÉNÉRATEUR EN UNE AUTRE FORME D'ÉNERGIE

Nous avons vu qu'un récepteur reçoit de la source un courant qui le traverse et présente des effets particuliers ; nous pouvons maintenant préciser : c'est un système qui reçoit de l'énergie électrique et la transforme en une énergie d'une ou plusieurs autres formes lorsqu'une *quantité d'électricité le traverse.*

Soit un voltamètre, par exemple (fig. 1).

*a*) Il apparait à sa cathode une masse $m$ de métal ou s'y dégage un volume $V$ d'hydrogène :

$W_1$ joules est l'énergie chimique fournie pendant un temps $t$ secondes.

*b*) Il s'échauffe : $W_2$ joules est l'énergie calorifique dissipée pendant le même temps ; le courant a fourni au voltamètre l'énergie $W = W_1 + W_2$ ; c'est la quantité d'électricité $Q$ coulombs qui, ayant traversé le voltamètre pendant ce temps, a fourni cette énergie $W$ joules.

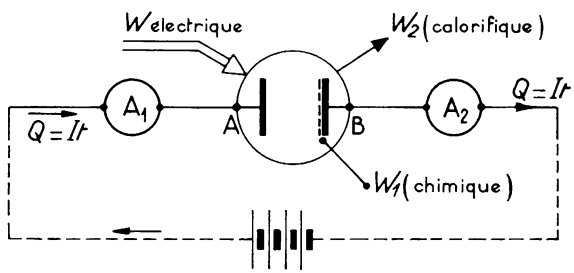



FIG. 1. — **Représentation schématique d'un voltamètre.** Les quantités d'électricité ne font que traverser le récepteur.

## 2. — DÉFINITION DE LA DIFFÉRENCE DE POTENTIEL

Au cours de la transformation précédente, chaque coulomb a cédé, en traversant le voltamètre, l'énergie $\frac{W}{Q}$.

Cette énergie cédée par chaque coulomb mesure la **différence de potentiel** ou **chute de tension** entre les bornes d'entrée et de sortie du récepteur ; on dit aussi par abréviation **la tension** et on la désigne par la lettre $U$ :

$$\boxed{U = \frac{W}{Q}.} \qquad (1)$$

**On appelle *différence de potentiel* (d.d.p en abrégé) ou *tension entre deux points*, la perte d'énergie par coulomb entre ces deux points.**

Remarque.

On peut dire que le courant circule d'un point A à un point B, parce qu'entre ceux-ci existe une *différence de niveau électrique* que l'on peut comparer à la *différence de niveau nécessaire à l'écoulement* d'un liquide entre deux points d'une canalisation ; c'est le générateur qui maintient la différence de niveau électrique entre les points A et B du circuit comme une pompe hydraulique peut entretenir une différence de niveau entre deux réservoirs situés à des hauteurs différentes (fig. 2).

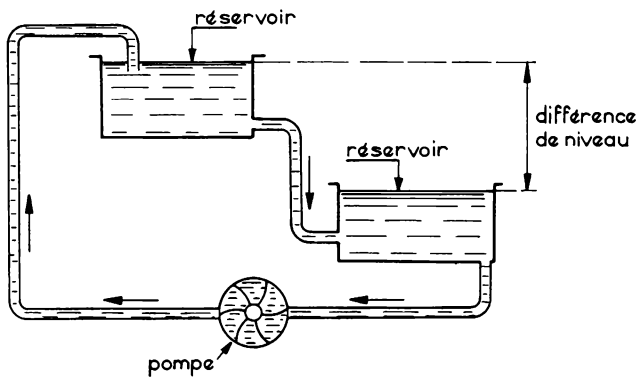



Fig. 2.—La pompe maintient la circulation d'eau en refoulant l'eau du réservoir le plus bas vers le réservoir le plus haut.

## 3. — UNITÉ S. I. DE DIFFÉRENCE DE POTENTIEL : PREMIÈRE DÉFINITION DU VOLT

Pour $W = 1$ joule et $Q = 1$ coulomb, l'expression (1) donne $U = 1$, c'est-à-dire l'unité de tension électrique, qui est donc le *joule par coulomb* ; pour honorer Volta (1), cette unité a été nommée ***volt***.

**Le volt est la différence de potentiel entre deux points d'un circuit entre lesquels chaque coulomb fournit une énergie de 1 joule.**

(1) Volta (1745-1827). Physicien italien, il réalisa la première pile électrique.

# B. — Énergie et puissance électriques

## 1. — EXPRESSION DE L'ÉNERGIE EN FONCTION DE LA TENSION

Dans la pratique, la quantité d'électricité $Q$ ne se prête pas à une mesure directe ; en régime permanent, elle est évaluée par le produit $It$ (car $Q = It$, leçon V).

Nous pouvons écrire :

$$U = \frac{W}{Q} = \frac{W}{It}$$

d'où l'énergie : $\boxed{W = UIt}$ (2)

$W$ en joule (J)
$U$ en volt (V)
$I$ en ampère (A)
$t$ en seconde (s)

## 2. — PUISSANCE EN FONCTION DE LA TENSION

Mais l'expression générale de la puissance étant :

$$P = \frac{W}{t}$$

on en déduit :

$$P = \frac{UIt}{t}$$

soit $\boxed{P = UI}$ (3) ou encore $\boxed{U = \frac{P}{I}}$

$P$ en watt (W)
$U$ en volt (V)
$I$ en ampère (A)

*La différence de potentiel entre deux points d'un circuit (ou aux bornes d'un récepteur) est numériquement égale au quotient de la puissance fournie à cette portion de circuit (ou à ce récepteur) par l'intensité du courant qui la traverse.*

## 3. — DEUXIÈME DÉFINITION DU VOLT (définition légale)

Nous pouvons maintenant donner la définition légale du volt. Pour $P = 1$ watt et $I = 1$ ampère, l'expression ci-dessus donne $U = 1$ volt :

**Le *volt* est la différence de potentiel (ou tension) qui existe entre deux points d'un conducteur parcouru par un courant constant de 1 ampère, lorsque la puissance dissipée entre ces deux points est égale à 1 watt.**

Multiples : le *kilovolt* (kV) = 1 000 V ou $10^3$ V
le *mégavolt* (MV) = 1 000 000 V ou $10^6$ V

Sous-multiples usuels : le *millivolt* (mV) = 0,001 V ou $10^{-3}$ V
le *microvolt* ($\mu$V) = 0,000 001 V ou $10^{-6}$ V

## 4. — MESURE PRATIQUE D'UNE TENSION

Une tension $U$ entre deux points A et B d'un circuit (ou aux bornes d'un récepteur) se mesure à l'aide d'un voltmètre branché en dérivation entre ces points (fig. 3 *a* et 3 *b*).

C'est un appareil de mesure semblable extérieurement à l'ampèremètre, qui permet par lecture directe de connaître la valeur de la tension : nous l'étudierons plus tard.

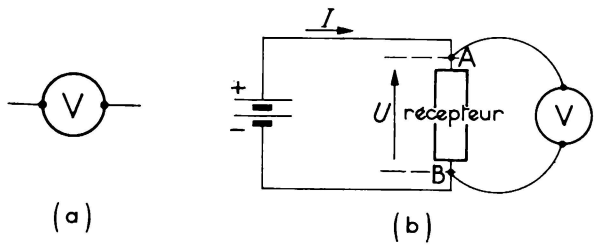
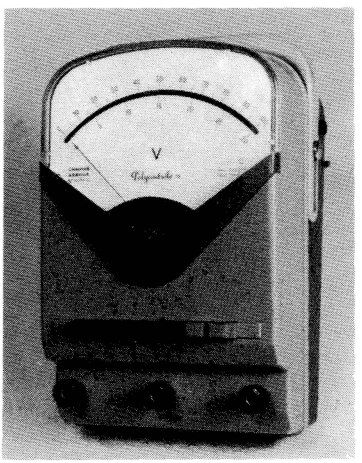



FIG. 3. — *a*) Symbole d'un voltmètre.
*b*) Un voltmètre est toujours disposé en dérivation aux bornes du récepteur.



**Voltmètre.**
*(Document Chauvin-Arnoux.)*

## 5. — ORDRE DE GRANDEUR DE TENSIONS USUELLES

— Une pile de lampe de poche : 4,5 V.
— Des accumulateurs d'automobile : 6 V, 12 V ou 24 V.
— Un générateur tournant (dynamo) à courant continu : 110 à 500 V.

A titre d'information, nous noterons, pour les générateurs alternatifs que nous étudierons plus tard :

— Prises de courant normales du secteur : 127 V et 220 V.
— Un alternateur : de 5 000 V à 20 000 V.
— Une ligne de transport d'énergie (H. T.) : 15 000 V à environ 480 000 V.

# C. — Groupements des récepteurs

## I. — EN DÉRIVATION (ou en parallèle)

Soient, par exemple, trois récepteurs : 1, 2, 3 (fig. 4 *a*) ; lorsque ceux-ci sont montés en dérivation, les entrées de chacun d'eux sont réunies en un même point et ramenées à l'une des bornes du générateur (+ par exemple) ; les sorties des trois récepteurs sont, de la même manière, réunies entre elles et ramenées à l'autre borne du générateur.

Ces récepteurs, ayant les *mêmes bornes*, sont donc soumis à la *même tension.*

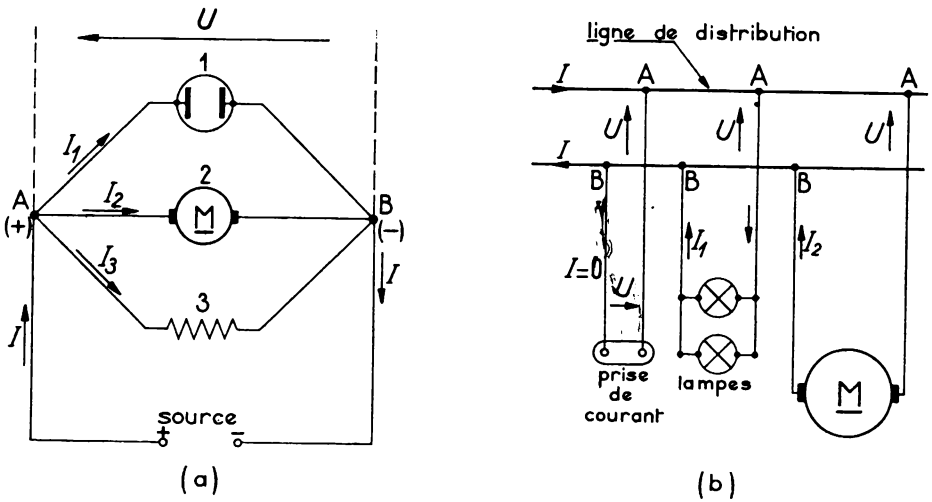



FIG. 4. — *a*) **1** est un voltamètre, **2** un moteur et **3** une résistance morte : ces trois récepteurs sont montés en parallèle sous la même tension. *b*) Une ligne de distribution fournit la même tension constante à tous les récepteurs.

Pratiquement un réseau assure une tension constante le long de ses lignes de distribution et les récepteurs conçus pour fonctionner sous cette tension sont nécessairement montés en dérivation comme l'indique la figure 4 *b*.

Rappelons que (fig. 4 *a*) : $I = I_1 + I_2 + I_3$.

## 2. — EN SÉRIE

*a*) Soit le montage de la figure 5 ; les récepteurs sont montés les uns à la suite des autres : une lampe L sur son support (1), un fil BC en nickel chrome de 1 mètre de long et 0,51 mm de diamètre, une résistance $R$ en constantan de 2,7 ohms montée sur un tube réfractaire. On dit que ces récepteurs sont montés en série (*revoir* p. 44).

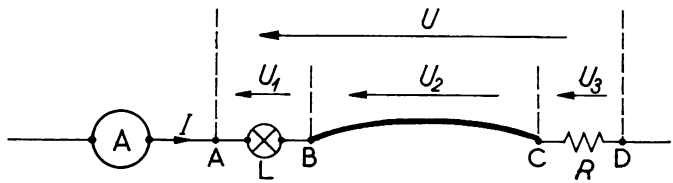



FIG. 5. — **Montage série.** Le courant est le même à travers tous les récepteurs. La tension totale est la somme des tensions aux bornes de chacun.

La tension d'alimentation est $U = 12$ V ; le courant est $I = 0{,}58$ ampère. Un voltmètre branché successivement aux bornes de l'ensemble AD et de chacun des éléments indique les valeurs suivantes :

$$U = 11{,}7 \text{ V} ; \; U_1 = 1{,}8 \text{ V} ; \quad U_2 = 3{,}1 \text{ V} ; \quad U_3 = 6{,}8 \text{ V}.$$

Ce qui montre que :

$$\boxed{U = U_1 + U_2 + U_3.}$$

*La tension totale aux bornes de récepteurs en série est égale à la somme des tensions partielles.*

*b*) Démontrons ce résultat de façon générale :

Si $W_1$, $W_2$, $W_3$ sont les énergies apparues dans les récepteurs et $W$ l'énergie électrique totale fournie par la source, on a (Principe de la conservation de l'énergie) :

$$W = W_1 + W_2 + W_3 ;$$

mais la même quantité d'électricité $Q$, transportée par le courant, a traversé tous les éléments en série; donc :

$$\frac{W}{Q} = \frac{W_1}{Q} + \frac{W_2}{Q} + \frac{W_3}{Q},$$

c'est-à-dire (p. 66) $$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

(Autre forme de démonstration : $P = P_1 + P_2 + P_3$; $UI = U_1I + U_2I + U_3I$).

---

(1) Lampe L : 12 V-15 W ; fil Tophet « A » Ni-Cr.

# D. — Notion de potentiel

## 1. — Tension entre deux points.

Considérons le schéma (fig. 6) et un point M sur le circuit ; mesurons les tensions suivantes :

entre A et M : $U_{AM} = 12$ V
entre B et M : $U_{BM} = 8$ V
entre A et B : $U_{AB} = 4$ V

D'après le paragraphe $C_2$ :

$$U_{AM} = U_{AB} + U_{BM}$$
$$U_{AB} = U_{AM} - U_{BM}$$

soit, en volts :

$$4 = 12 - 8.$$

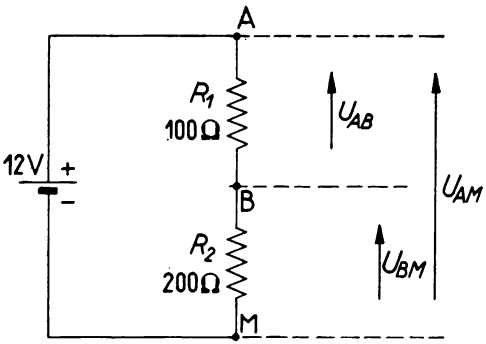
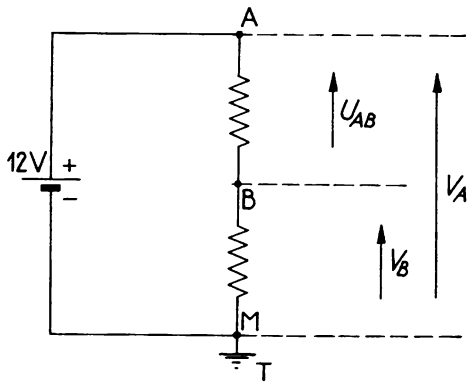



FIG. 6. — $U_{AB} = U_{AM} - U_{BM}$.

## 2. — Potentiel d'un point.

Relions M au sol (fig. 7 *a* et *b*) et convenons d'appeler **potentiel** du point A **sa tension électrique par rapport au sol** :
c'est $U_{AM}$, que l'on convient d'abréger en $U_A$ ou mieux $V_A$ ; de même pour le potentiel de B : c'est $U_{BM}$, que l'on écrit $U_B$ ou mieux $V_B$.
(La lettre $U$ est réservée aux tensions, la lettre $V$ aux potentiels.) (1)



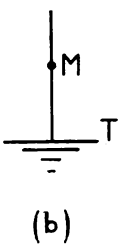




FIG. 7. — *a*) $U_{AB} = V_A - V_B$.
La tension entre A et B est la différence des potentiels de A et de B.
*b*) Symbole de mise à la terre.

On voit maintenant que : $U_{AB} = V_A - V_B$.

Cette égalité justifie l'expression : *différence de potentiel entre deux points* comme synonyme de *tension*.

(1) $V$ est aussi le symbole de réserve pour les tensions.

### 3. — Potentiel positif ; potentiel négatif.

*a*) Le potentiel d'un point peut être *positif* par rapport à la terre. Ceci entraîne que le générateur ait son pôle « moins » relié à la terre.

EXEMPLE (fig. 7 *a*) :

$$V_A = +12 \text{ V} ; \quad V_B = +8 \text{ V}$$

d'où $$V_A - V_B = (+12) - (+8) = 4 \text{ V}.$$

*b*) Le potentiel d'un point peut être *négatif* par rapport à la terre. Ceci entraîne que le générateur ait son pôle « plus » relié à la terre.

EXEMPLE (fig. 7 *c*) :

$$V_A = -12 \text{ V}; \quad V_B = -8 \text{ V}$$

d'où $$V_A - V_B = (-12) - (-8) = -4 \text{ V}.$$

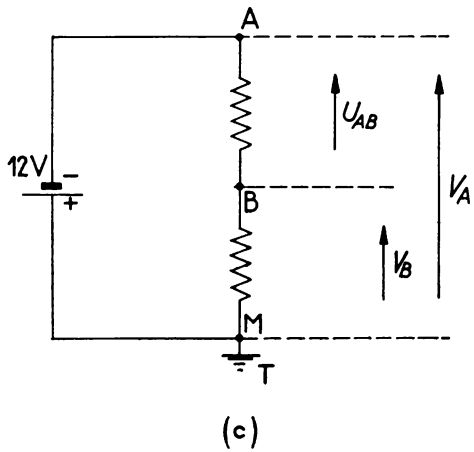



FIG. 7. — c) Le potentiel de A est négatif par rapport à la terre ; $U_{AB} = V_A - V_B = -4$ V.

### 4. — Masse.

Beaucoup d'appareils électriques possèdent un châssis métallique, de section assez grande pour que sa résistance entre deux points quelconques soit très petite, pratiquement nulle : il n'apparaît donc pas de différence de potentiel lorsque ce châssis est parcouru par un courant ; on dit que le châssis est *équipotentiel.*

On peut réunir l'une des bornes du générateur d'un circuit (fig. 8) et celle correspondante du récepteur, au châssis ; on fait ainsi l'économie du fil de retour : on dit qu'il y a « retour » du courant *par la masse* ou encore « liaison » par la masse.

Les points $M_1$, $M_2$, $M_3$ sont à la masse, ils constituent les *points froids* du circuit ; le point C, relié au pôle positif du générateur et isolé du châssis, est dit « *point chaud* ». Dans les montages alimentés sous quelques centaines de volts, un opérateur — lui-même à la masse — peut toucher sans danger *seulement* les points froids.

REMARQUE.

Deux générateurs ou un générateur formé d'éléments en série permettent d'obtenir simultanément des points de potentiels positifs et des points de potentiels négatifs (fig. 9).

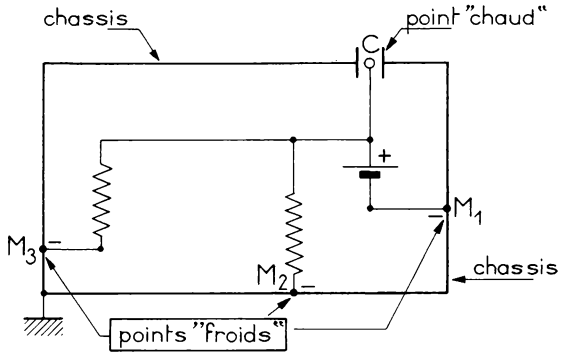



FIG. 8. — Le retour du courant se fait par le châssis.

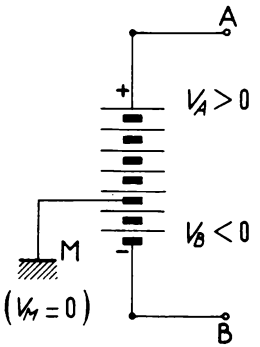



FIG. 9.

# E. — Mesures de la puissance

## I. — MESURE D'UNE PUISSANCE

Elle s'effectue par l'un des deux procédés suivants :

*a*) La puissance d'un appareil électrique à courant continu se mesure avec un ampèremètre et un voltmètre.

Puisque la puissance électrique fournie à un récepteur est donnée par la relation $P = UI$, il suffit de relever au voltmètre la tension $U$ volts aux bornes de l'appareil, de relever le courant I qui le traverse et de faire le produit des lectures (fig. 10).

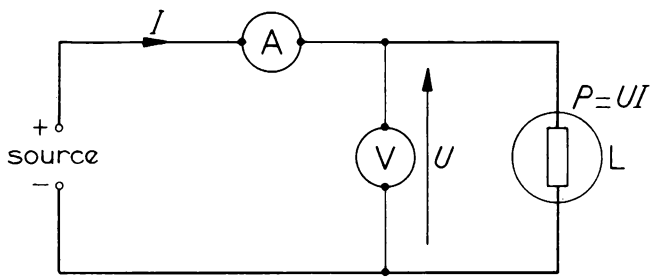



FIG. 10. — La lampe consomme la puissance $P = UI$ watt.

*b*) La puissance se mesure directement au **wattmètre** (fig. 11 *a*).

Le wattmètre est un appareil qui permet, par lecture directe, la connaissance de la puissance mise en jeu dans un récepteur. Le montage est donné par la figure 11 *b*.

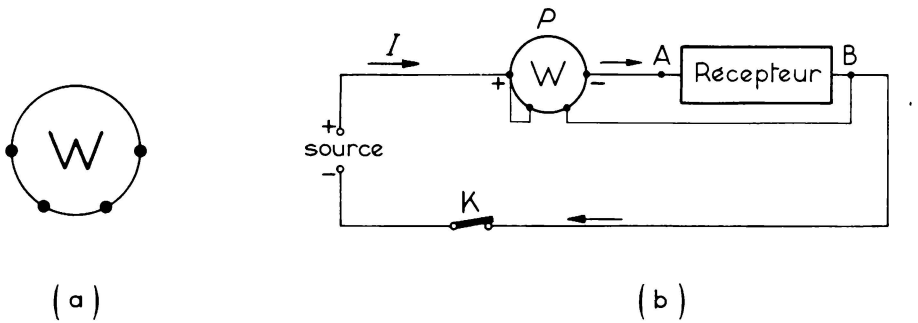



FIG. 11. — *a*) Symbole du wattmètre. *b*) Les deux bornes « intensité » sont en série avec le récepteur ; les deux bornes « tension » sont en dérivation aux bornes du récepteur.

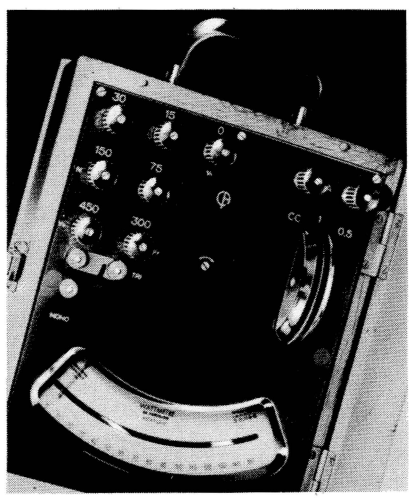
REMARQUE 1.

*La puissance nominale* est celle pour laquelle un appareil a été construit ; c'est celle que fournit un appareil dans des conditions de fonctionnement normal ; elle est inscrite sur la plaque signalétique de l'appareil. Ainsi une génératrice construite pour débiter, en service continu, 50 ampères avec 110 volts à ses bornes, a une puissance nominale de 5,5 kW; quand elle fournit seulement, par exemple 10 ampères, sous 110 volts, sa puissance *effective* est 1 100 watts.

REMARQUE 2.

Chaque récepteur électrique porte deux indications; par exemple 220 V-40 W ; le premier nombre correspond à la tension nominale sous laquelle il doit fonctionner, le deuxième correspond à la puissance absorbée quand il fonctionne sous cette tension. On en déduit l'*intensité nominale :*

$$I = \frac{P}{U} = \frac{40}{220} \approx 0{,}18 \text{ A.}$$



**Wattmètre.**
*(Document Chauvin-Arnoux.)*

REMARQUE 3.

Multiples du watt : le *kilowatt* (kW) : 1 kW = 1 000 W = $10^3$ W

le *mégawatt* (MW) : 1 MW = 1 000 000 W = $10^6$ W

Sous-multiples : le *milliwatt* (mW) : 1 mW = 0,001 W = $10^{-3}$ W

le *microwatt* ($\mu$W) : 1 $\mu$W = 0,000 001 W = $10^{-6}$ W

## 2. — EXEMPLES DE MESURES

Mesurons la puissance consommée par une lampe à incandescence marquée 125/130 V-100 W.

*a*) **Méthode du voltmètre et de l'ampèremètre.**

On mesure : $U = 120$ V; $I = 0{,}77$ A.

D'où $P = UI = 120 \times 0{,}77 = 92{,}4 \approx 92$ W.

*b*) **Wattmètre.**

150 divisions; calibres : 150 V, 1 A.

1 division vaut donc 1 W.

On lit 93 divisions, donc $P = 93$ W.

L'écart relatif avec la première mesure (92,4 W) est inférieur à 1 %.

## 3. — ORDRE DE GRANDEUR DE PUISSANCES ÉLECTRIQUES

| | | |
|---|---|---|
| — Lampe de poche | : 0,8 W | |
| — Lampe d'éclairage domestique | : 25 à 150 W | |
| — Radiateur électrique | : 1 000 W | ou 1 kW |
| — Locomotive électrique | : 400 000 à 500 000 W | ou 400 à 500 kW |
| — Générateur électrique de centrale | : 100 000 000 W et jusqu'à 600 000 kW. | ou 100 000 kW |

# F. — Exercices résolus

**1.** *Trois récepteurs sont montés en série et parcourus par un courant de 2 A; sachant qu'ils consomment respectivement 36 000 J, 12 000 J, 84 000 J en 10 mn, calculer:*

a) *La tension supportée par chaque récepteur.*

b) *La tension totale appliquée.*

**Solution.**

Un courant de 2 A pendant 10 mn ou 600 s correspond au passage d'une quantité d'électricité :

$$Q = It = 2 \times 600 = 1\,200 \text{ C.}$$

La tension aux bornes d'un récepteur est $U = \frac{W}{Q}$ :

$$U_1 = \frac{36\,000}{1\,200} = 30 \text{ V} ; \quad U_2 = \frac{12\,000}{1\,200} = 10 \text{ V} ; \quad U_3 = \frac{84\,000}{1\,200} = 70 \text{ V.}$$

La tension totale appliquée est :

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = 30 + 10 + 70 = 110 \text{ V.}$$

**Autre solution.** Puissances des récepteurs :

$$P_1 = \frac{W_1}{t} = \frac{36\,000}{600} = 60 \text{ W} ; \qquad P_2 = \frac{12\,000}{600} = 20 \text{ W} ; \qquad P_3 = \frac{84\,000}{600} = 140 \text{ W} ;$$

$$U_1 = \frac{P_1}{I} = \frac{60}{2} = 30 \text{ V, etc.}$$

**2.** *Un radiateur électrique absorbe 550 W sous une différence de potentiel de 110 V. On demande :*

1° *L'intensité du courant.*

2° *L'énergie absorbée en 12 heures.*

**Solution.**

1° L'intensité du courant est :

$$I = \frac{P}{U} = \frac{550}{110} = 5 \text{ A.}$$

2° L'énergie est, en wattheure :

$$W = Pt = 550 \times 12 = 6\,600 \text{ Wh.}$$

Et en joule : $6\,600 \times 3\,600 = 23\,760\,000 \text{ J} = 23\,760 \text{ kJ.}$

**3.** *Un récepteur a consommé 176 Wh en 20 mn pour un courant d'alimentation de 2,4 A. Quelle est la tension à ses bornes?*

**Solution.**

Expression de l'énergie électrique consommée :

$$W = UIt \text{ (Wh, V, A, h).}$$

D'où :

$$U = \frac{W}{It}$$

$$U = \frac{176}{2{,}4 \cdot \frac{20}{60}} = 220 \text{ V.}$$

**4.** *Un wattmètre de calibres 150 V et 300 V, 2,5 A et 5 A comporte 150 divisions.*

1° *Quelle est la valeur en watt d'une division dans chacun des quatre branchements possibles?*

2° *On l'utilise pour vérifier la puissance d'un récepteur qui, alimenté sous 120 V, consomme 3,0 A : sur quels calibres l'utilise-t-on et quelle est la déviation, en divisions?*

**Solution.**

1° Sur les calibres 150 V-2,5 A, la déviation est totale pour $150 \times 2{,}5$ W et une division vaut donc :

$$\frac{150 \times 2{,}5}{150} = 2{,}5 \text{ W.}$$

De façon analogue, pour les trois autres cas :

$$\frac{150 \times 5}{150} = 5 \text{ W}; \quad \frac{300 \times 2{,}5}{150} = 5 \text{ W}; \quad \frac{300 \times 5}{150} = 10 \text{ W}.$$

2° Calibre 150 V (et non 300 V) pour obtenir la plus grande déviation possible. Mais calibre 5 A (puisque $I = 3 > 2{,}5$ A).

Une division vaut 5 W ; la puissance

$$P = UI = 120 \times 3 = 360 \text{ W}$$

correspond à $\frac{360}{5} = 72$ divisions.

REMARQUE. — Sur les calibres 150 V-2,5 A, la déviation serait $72 \times 2 = 144$ divisions $< 150$ divisions et un opérateur inattentif ne s'apercevrait pas que le circuit intensité consomme trop et se détériore.

## PROBLÈMES DE LA LEÇON VII

**1.** Une lampe à incandescence absorbe une puissance $P = 88$ watts sous une tension constante $U = 220$ volts ; quelle est l'intensité $I$ du courant dans le filament ? En supposant la résistance du filament invariable, que deviendrait la puissance absorbée, si on doublait l'intensité ?

**Réponses : $I = 0{,}40$ A ; $P' = 352$ W (4 fois plus grande).**

**2.** Une génératrice de courant continu débite un courant constant $I = 40$ ampères et fournit une énergie utile $W = 4{,}4$ kWh en un temps $t = 30$ mn. Quelles sont :

1° Sa puissance?
2° Sa tension aux bornes?

**Réponses : 1° $P = 8{,}8$ kW ; 2° $U = 220$ V.**

**3.** Une cuve à électrolyse est traversée par un courant $I = 5$ ampères et absorbe une énergie totale $W = 324$ kilojoules en un temps $t = 1$ heure 30 minutes. Quelle est la tension électrique $U$ appliquée à ses bornes ?

**Réponse : $U = 12$ V.**

**4.** Dans un tube électronique dans lequel est réalisé le vide, on applique entre l'anode et la cathode qui émet des électrons, une tension continue $U = 250$ volts, dite *tension d'accélération*.

*a*) Quelle est la puissance $P$ dissipée en chaleur sur l'anode si le courant anodique est $I_a = 10$ milliampères ?

*b*) Quel est le nombre d'électrons $n$ émis par la cathode en un temps $t = 1$ seconde ?

*c*) Sachant que l'énergie cinétique d'un électron est le produit $eU$ de la charge électrique $e$ d'un électron par la tension $U$, vérifier le résultat de la question *a*).

On rappelle que la charge d'un électron est, en valeur absolue, $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ coulomb.

**Réponses : a) $P = 2{,}5$ W ; b) $n = 6{,}25.10^{16}$.**

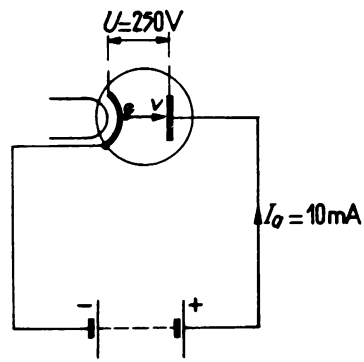



FIG. Pb 4.

**5.** Un chauffe-eau électrique à accumulation de 150 litres a une résistance chauffante fournissant 1 500 watts sous 220 volts. Il met 8 heures pour porter la température de l'eau de 15° C à 75° C.

*a*) Quelle est l'intensité $I$ dans les fils d'alimentation ?

*b*) Quelle est la consommation $W_c$ d'énergie pour réaliser ce chauffage ?

*c*) Quelle est la perte d'énergie $W_p$ de ce chauffe-eau ? On donne : 1 cal = 4,18 J.

*d*) Quel est le rendement $\eta$ de ce chauffage ?

*(C. A. P. électrotechnique ; Paris, 1967.)*

**Réponses : a) $I = 6{,}8$ A ; b) $W_c = 12$ kWh ou 43 200 kJ ; c) $W_p = 1{,}55$ kWh ou 5 580 kJ ; d) $\eta = 87$ %.**

**6.** On lit sur un wattmètre les indications : $U = 120$ volts, $I = 5$ ampères et sa graduation comporte 120 divisions.

1° Quelle est, en watts, la valeur d'une division ?

2° On mesure, à l'aide de ce wattmètre, la puissance absorbée par une résistance chauffante $R$.

*a*) Tracer le schéma du montage.

*b*) Sachant que $U = 120$ volts et que le wattmètre dévie de 60 divisions, calculer $R$.

**Réponses : 1° 5 W/div ; 2° b) $R = 48\ \Omega$.**

# VIII. — LOI D'OHM RELATIVE A UNE RÉSISTANCE

**MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL :**

— source de 0 à 6 ou 12 volts (accumulateur, Transtabil...) ;
— fil d'alliage nickel-chrome-fer de 1 m de long, ø 51/100 mm;
— ampèremètre ;
— voltmètre ;
— rhéostat ;
— ohmmètre.

## A. — Démonstration à partir de la loi de Joule

### I. — RÉSISTANCE MORTE

Soit un fil conducteur parcouru par un courant (fig. 1 *a*) ; il s'échauffe, et toute l'énergie électrique reçue se transforme en chaleur. D'une manière générale, un récepteur qui transforme toute l'énergie reçue en chaleur est appelé *récepteur thermique ;* on dit aussi souvent que c'est une « résistance morte », ou simplement une « résistance », et on la représente par l'un des symboles de la figure 1 *b*.

Citons comme exemples usuels de résistances mortes : lampes à incandescence, résistances chauffantes (radiateurs, fer à souder, chauffe-eau...).

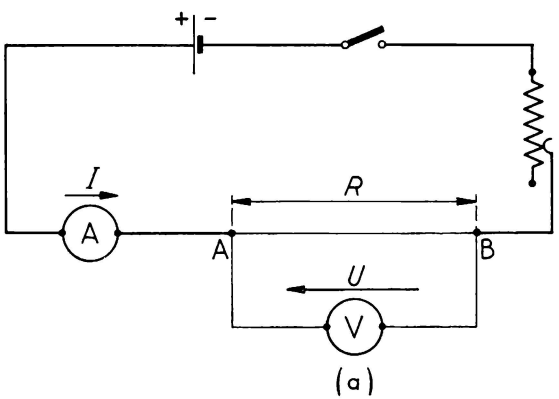



FIG. 1 *a*).

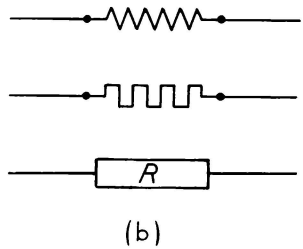
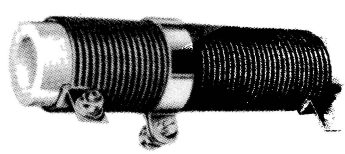



FIG. 1 *b*). — Symboles graphiques. En bas, les deux symboles normalisés. En haut, l'ancien symbole.



**Résistance.**
*(Document S.O.F.A.I.R.-A.D.B.)*

## 2. — LA LOI D'OHM EST UNE CONSÉQUENCE DE LA LOI DE JOULE

Considérons, dans ces conditions, la portion de circuit AB (fig. 2), parcourue par un courant $I$ lorsqu'une différence de potentiel est maintenue entre A et B.

La puissance électrique fournie à ce circuit est :

$$P = UI. \qquad (1)$$

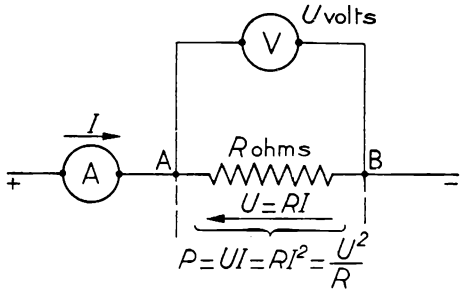



FIG. 2.

Mais, dans une résistance morte, toute la puissance électrique reçue est dissipée sous forme de chaleur ; si $R$ est la résistance de la portion de circuit, on a (d'après la loi de Joule, p. 57) :

$$P = RI^2$$

Égalons ces deux expressions de la puissance $P$ :

Puissance fournie au circuit = Puissance dissipée dans le circuit

$$UI = RI^2$$

ou, en simplifiant :

$$\boxed{U = RI} \quad (2) \quad \begin{cases} U \text{ en volt (V).} \\ R \text{ en ohm } (\Omega). \\ I \text{ en ampère (A).} \end{cases}$$

Cette formule est l'expression de la loi d'Ohm (1) ; celle-ci s'énonce :

*La différence de potentiel aux bornes d'un récepteur uniquement thermique est égale au produit de la résistance de ce récepteur par l'intensité du courant qui le traverse.*

REMARQUE.

Il résulte de la loi d'Ohm que, *lorsque la résistance d'un conducteur est invariable*, la tension entre ses bornes est proportionnelle à l'intensité du courant qui le traverse :

$$\frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2}{I_2} = \frac{U_3}{I_3} = \ldots = R.$$

(1) OHM (1787-1854). Physicien allemand célèbre par ses travaux sur la propagation de l'électricité dans les circuits électriques.

# B. — Expérience de vérification

Nous vérifierons la remarque précédente.

Reprenons le montage de la figure 1 ; considérons une résistance $R$ constituée par un fil d'alliage nickel-chrome-fer de longueur 1 mètre, de diamètre 51/100 mm et montée entre A et B; cette résistance s'échauffe peu lorsqu'elle est parcourue par de petits courants. Relevons la tension aux bornes A et B pour diverses intensités obtenues au moyen du rhéostat; on mesure :

| $U$ (V) | 1,3 | 2,6 | 3,9 | 5,2 |
|---|---|---|---|---|
| $I$ (A) | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1 |
| $R = \frac{U}{I}$ (Ω) | 5,2 | 5,2 | 5,2 | 5,2 |

Il existe donc des cas (1) commodes pour vérifier la loi d'Ohm, où la résistance est indépendante de l'intensité du courant ; mais la relation $U = RI$ est toujours vraie pour un état donné, même si $R$ varie parce que différentes températures sont atteintes ou pour d'autres raisons.

# C. — Expressions de la puissance dissipée dans une résistance

La puissance électrique fournie à une portion de circuit AB, comme dans tout récepteur, est d'après la relation (1) :

$$P = UI.$$

Dans le cas particulier d'une résistance, on a, d'après la relation (2) :

$$I = \frac{U}{R}.$$

On peut donc écrire :

$$P = U\left(\frac{U}{R}\right) = \frac{U^2}{R}$$

$$\boxed{P = \frac{U^2}{R}} \quad \begin{cases} P \text{ en watt (W).} \\ U \text{ en volt (V).} \\ R \text{ en ohm (Ω).} \end{cases}$$

La puissance dissipée en chaleur dans un récepteur uniquement thermique est proportionnelle au carré de la différence de potentiel qui lui est appliquée et inversement proportionnelle à sa résistance.

En résumé :

L'expression de la puissance dissipée peut s'exprimer par l'une des égalités suivantes (fig. 2) :

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}.$$

(1) Nous utilisons le ferro-nickel parce que son coefficient de température (voir IX, § B 3) est pratiquement nul.

# D. — Applications

Dans la pratique du laboratoire ou des installations, on est amené à utiliser la loi d'Ohm sous toutes les formes possibles :

$$R = \frac{U}{I} \; ; \qquad U = RI \; ; \qquad I = \frac{U}{R}.$$

## I. — MESURE D'UNE RÉSISTANCE

*a*) **A l'aide d'un voltmètre et d'un ampèremètre** (fig. 3) : $R = \frac{U}{I}$.

C'est la méthode voltampèremétrique ; sous la forme $R = \frac{U}{I}$, la loi d'Ohm permet la mesure de la résistance d'un conducteur AB ; il suffit d'introduire celui-ci dans un circuit alimenté par un générateur à courant continu. Un voltmètre, en *dérivation*, mesure la tension $U$ aux bornes de $R$ ; un ampèremètre en *série* avec $R$, mesure l'intensité $I$.

Remarque.

On prend $R = \frac{U}{I}$ (au lieu de la valeur exacte $R = \frac{U}{I - i}$) car, avec les voltmètres de construction récente — de résistance $R_V$ très élevée — on a en général $R_V \gg R$. Pour mesurer des résistances $R$ non négligeables devant $R_V$, il faudrait réaliser le montage de la figure 4 ; on prend encore $R = \frac{U}{I}$ (au lieu de la valeur exacte $R = \frac{U - u}{I}$), car la résistance $r$ des ampèremètres est faible et $u$ est alors négligeable devant $U$ (1).

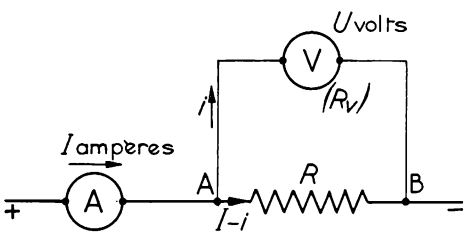



Fig. 3. — Mesure d'une résistance $R = \frac{U}{I}$.
Montage aval (du voltmètre) ou en courte dérivation : cas des faibles résistances.

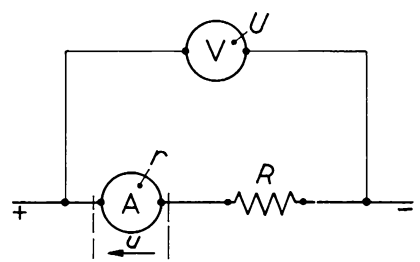



Fig. 4. — Montage amont ou en longue dérivation : cas des fortes résistances.

C'est seulement dans des cas très particuliers (§ B) que la valeur $R$ est indépendante de la température, donc de l'intensité et de la durée de l'expérience ; c'est pourquoi il est indispensable d'indiquer les conditions de mesure (intensité du courant, température ambiante).

(1) Pour plus de détails, voir : *Manipulations d'électricité*, par P. Monfort et J. Ricard (Édit. Foucher).

*b*) **A l'aide d'un ohmmètre** (fig. 5).

C'est un appareil donnant la valeur d'une résistance par lecture directe ; on l'utilise surtout pour avoir un ordre de grandeur ou dans le cas de très grandes résistances, car sa précision est médiocre (principe de l'ohmmètre : voir L. XI, exercice n° 8).

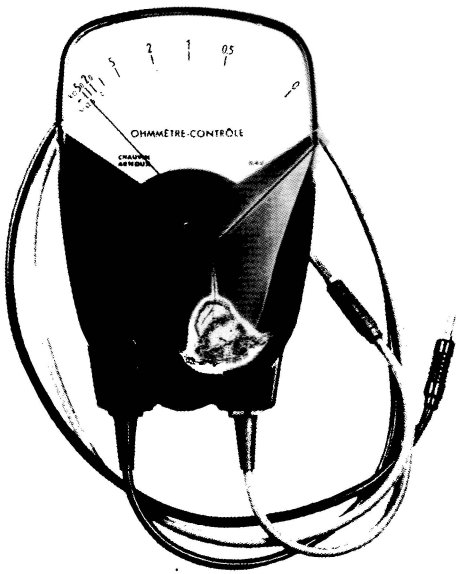



FIG. 5. — **Ohmmètre.**
*(Document Chauvin-Arnoux.)*

*c*) **Par la méthode de comparaison.**

La résistance $x$ à mesurer est disposée en série avec une résistance $R$ étalon (p. 107) ; on mesure avec un même appareil les tensions $U_R$ et $U_X$ aux bornes de ces résistances traversées par le même courant $I$.

On a :

$$U_X = xI$$
$$U_R = RI$$

d'où $\boxed{x = R\,\dfrac{U_X}{U_R}.}$

## 2. — SÉCURITÉ D'UN APPAREIL

Certains appareils sont prévus pour fonctionner sous une certaine tension (120 V, 220 V...) dite *tension nominale :* il suffit de respecter cette tension.

Pour d'autres éléments, on connaît la résistance $R$ de l'appareil et l'intensité maximale ($I_{max}$) qu'il supporte.

*a*) Tension maximale applicable : $\boxed{U_{max} = RI_{max}.}$

Avant de brancher sur une prise, calculer $U_{max}$ et s'assurer que la tension de cette prise est inférieure à $U_{max}$.

*b*) Tension d'alimentation donnée $U$.

La tension $U$ étant imposée, avant de brancher, calculer $I = \dfrac{U}{R}$ :

Si $I < I_{max}$, on peut brancher sans danger.

Si $I > I_{max}$, il est nécessaire d'introduire dans le circuit un rhéostat pour limiter l'intensité ; nous calculerons la résistance minimale de ce rhéostat ultérieurement (leçon X, § E et F).

# E. — Exercices résolus

**1.** *A quelle valeur faut-il régler l'intensité du courant dans une résistance morte de 8 ohms pour que la tension à ses bornes soit 24 volts?*

**Solution.**

La loi d'Ohm pour une résistance morte est :

$$U = RI.$$

On doit donc régler l'intensité à travers la résistance à la valeur :

$$I = \frac{U}{R} = \frac{24}{8} = 3 \text{ ampères.}$$

**2.** *Calculer, pour un régime de fonctionnement normal, le courant absorbé et la résistance électrique des appareils suivants dont on donne les caractéristiques nominales: 1 lampe marquée 120 V-30 W ; 1 radiateur 220 V-3 000 W.*

**Solution.**

*a*) Pour la lampe :

Courant absorbé : $I = \frac{P}{U} = \frac{30}{120} = 0{,}25$ A.

Résistance : $R = \frac{U}{I} = \frac{120}{0{,}25} = 480\ \Omega.$

Ou : $R = \frac{U^2}{P} = \frac{120^2}{30} = 480\ \Omega.$

*b*) Pour le radiateur :

$$U = 220 \text{ V}; \quad P = 3000 \text{ W}$$

Courant absorbé : $I = \frac{P}{U} = \frac{3\,000}{220} = 13{,}64 \text{ A} \approx 13{,}6 \text{ A}.$

Résistance : $R = \frac{U}{I} = \frac{220}{13{,}64} \approx 16{,}1\ \Omega.$

**3.** *Un récepteur thermique porte les indications: 220 V, 3 600 W. Calculer en régime normal de marche:*

1° *L'intensité du courant.*

2° *La résistance du récepteur.*

3° *L'énergie électrique consommée en 12 heures.*

**Solution.**

1° Intensité du courant :

$$I = \frac{P}{U} = \frac{3\,600}{220} = 16{,}36 \approx 16{,}4 \text{ A}.$$

2° Résistance ohmique du récepteur :

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{(220)^2}{3\,600} = 13{,}4\ \Omega.$$

3° Énergie consommée en 12 heures :

$$W = Pt = 3\,600 \times 12 = 43\,200 \text{ Wh ou } 43{,}2 \text{ kWh}.$$

## PROBLÈMES DE LA LEÇON VIII

**1.** Un radiateur électrique à circulation d'huile porte sur sa plaque signalétique les indications : 1 500 W ; 220 V. Calculer pour un régime de fonctionnement normal :

*a*) L'intensité $I$ du courant.

*b*) La résistance électrique $R$ des éléments chauffants.

*c*) Le prix de revient du chauffage pour 3 heures de fonctionnement au tarif 1re tranche : 0,43 F le kilowattheure.

**Réponses : a) $I \approx 6{,}82$ A ; b) $R \approx 32{,}3\ \Omega$ ; c) Prix de revient $\approx 1{,}94$ F.**

**2.** Une résistance morte $R = 25$ kiloohms dissipe en chaleur une puissance $P = 6$ microwatts : quelle est la tension $U_1$ qui lui est appliquée ?

Pour avoir la même dissipation avec une résistance $R' = 1$ mégohm, quelle doit être la nouvelle tension $U_2$ appliquée ?

**Réponses : $U_1 = 387$ mV ; $U_2 = 2{,}45$ V.**

**3.** On alimente en série une résistance étalon $R = 10\ \text{k}\Omega$ et une résistance inconnue $x$ ; un voltmètre indique alors : aux bornes de $R$ : 20 divisions ; aux bornes de $x$ : 15,2 divisions.

Quelle est la valeur de $x$ ?

**Réponse : $x = 7{,}6\ \text{k}\Omega$.**

**4.** 1° Tracer les courbes $R = f(U)$ d'une lampe à filament de tungstène : 60 watts, 110 volts et celle d'une lampe à filament de carbone : 32 bougies ; 110 volts.

On a relevé successivement, à l'aide d'un voltmètre (calibre : 100 volts ; échelle : 100 divisions) et d'un ampèremètre (calibre : 1 ampère ; échelle : 100 divisions), les valeurs suivantes :

| $U$ (V) | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| L. tungstène | $I$ (div.) | 16 | 20 | 23,8 | 27 | 31 | 30 | 35,5 | 38 | 40,5 | 42,5 |
| L. carbone | $I$ (div.) | 3,7 | 8 | 12,5 | 18,3 | 24,5 | 31 | 38 | 45 | 52 | 59,5 |

2° Tracer les courbes $U = f(I)$ pour la lampe à filament de tungstène, puis pour la lampe à filament de carbone.

Pour un point M donné sur l'une d'elles, on considère le triangle rectangle OM$m$, $m$ étant la projection de M sur l'axe des courants et O l'origine des coordonnées. On pose $\widehat{m\text{OM}} = \alpha$.

*a*) Montrer que $\text{tg}\,\alpha = R$.

*b*) En déduire le sens de variation de $R$ lorsque la température s'élève pour le filament de tungstène, puis pour le filament de carbone.

**Réponses : 2° $R$ croît pour tungstène ; $R$ décroît pour carbone.**

**5.** Trois résistances connues $a$, $b$, $R$ et une résistance inconnue $x$ à mesurer sont disposées suivant les côtés d'un losange A, B, C, D. Dans la diagonale BD est placé un galvanomètre, dans l'autre, AC, une pile de 1,5 volt : on a réalisé un pont de Wheatstone.

On dit que le pont est en équilibre lorsque l'aiguille du galvanomètre est située sur le zéro, médian, de la graduation.

1° Écrire la condition d'équilibre du pont et en déduire l'expression littérale donnant $x$.

2° Pour $a = 1{,}0\ \Omega$ et $b = 10\ \Omega$, le pont est en équilibre lorsque $R = 40{,}9\ \Omega$ : quelle est la valeur de la résistance à mesurer?

**Réponse : 2° $x = 4{,}09 \approx 4{,}1$ ohms** (si nécessaire, *voir* la figure p. 95).

# IX. — EXPRESSION D'UNE RÉSISTANCE. RÉSISTIVITÉ

**MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL :**

— source de 0 à 12 volts (accumulateurs, Transtabil...) ;
— conducteur en nickel-chrome-fer de 2 m de long, ø 51/100 ;
— conducteur en nickel-chrome de 1 m de long, ø 51/100 ;
— conducteur en nickel-chrome de 1 m de long, ø 102/100 ;
— conducteur en cuivre de 1 m de long, ø 136/100 ;
— ampèremètre ;
— voltmètre ;
— rhéostat.

## A. — Expériences

### I. — LA RÉSISTANCE D'UN FIL CONDUCTEUR DÉPEND DE SA LONGUEUR

Soit un circuit (fig. 1) constitué d'un conducteur AB en nickel-chrome-fer de 2 mètres de longueur, 0,51 millimètre de diamètre et alimenté par quelques éléments de batterie; nous mesurons l'intensité du courant qui y circule à l'aide d'un ampèremètre monté en série; un voltmètre dont une connexion est fixe en A tandis que l'autre est mobile permet de mesurer les tensions $U$ le long de AB; nous pouvons alors appliquer la méthode de mesure d'une résistance.

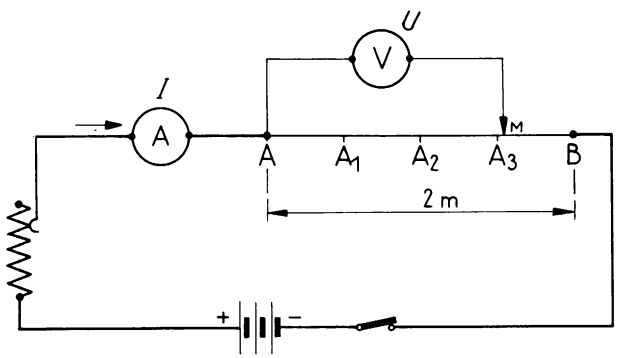



FIG. 1. — Lorsque le contact mobile M glisse de A jusqu'en B, $I$ demeure constant, mais $U$ croît progressivement de 0 à 10,4 V; la résistance croît donc avec la longueur du fil. Si l'on se fixe une valeur de l'intensité, un rhéostat est nécessaire au réglage (*voir* p. 91 et 93).

Relevons les lectures de $U$ pour les points $A_1$, $A_2$, $A_3$, B, situés à 50 centimètres les uns des autres, pour $I = 1$ ampère :

| Conducteur. | Longueur (cm). | Tension $U$ (V). | Résistance : $R = \frac{U}{I}$ ($\Omega$) |
|---|---|---|---|
| $AA_1$ | $l_1 = 50$ | 2,6 | 2,6 |
| $AA_2$ | $l_2 = 100$ | 5,2 | 5,2 |
| $AA_3$ | $l_3 = 150$ | 7,8 | 7,8 |
| AB | $l_4 = 200$ | 10,4 | 10,4 |

Nous observons que lorsque la longueur devient 2, 3... fois plus grande, la résistance devient 2, 3... fois plus grande aussi :

**La résistance d'un fil conducteur, de section et nature données, est proportionnelle à sa longueur :**

$$\frac{R_1}{l_1} = \frac{R_2}{l_2} = \frac{R_3}{l_3}.$$

## 2. — LA RÉSISTANCE D'UN FIL CONDUCTEUR DÉPEND DE SA SECTION

Soient deux fils de nickel-chrome de même longueur 1 mètre, de diamètres $d$ et $2\,d$, parcourus par le courant $I$ (fig. 2) ; nous obtenons :

| pour $d = 0{,}51$ mm ; section $s$ | | | | | pour $2\,d$ ; section $4\,s$ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $d$ (mm) | $s$ (mm²) | $I$ (A) | $U$ (V) | $R = \frac{U}{I}$ ($\Omega$) | $2\,d$ (mm) | $s' = 4\,s$ (mm²) | $I$ (A) | $U'$ (V) | $R' = \frac{U}{I}$ ($\Omega$) |
| 0,51 | $\frac{\pi}{4}(0{,}51)^2$ | 1 | 5,2 | 5,2 | 1,02 | $\frac{\pi}{4}(1{,}02)^2$ | 1 | 1,3 | 1,3 |

Ces résultats montrent que pour une même intensité de courant, si la section est multipliée par 4, la résistance est divisée par 4. En d'autres termes :

$$\frac{R'}{R} = \frac{s}{s'} \text{ ou } Rs = R's' = \ldots.$$

**La résistance d'un fil conducteur homogène est inversement proportionnelle à sa section.**

### 3. — LA RÉSISTANCE D'UN FIL CONDUCTEUR DÉPEND DE SA NATURE

Soumettons à la même tension entre deux points A et B d'un circuit, des fils de même longueur, de même section, mais de natures différentes, par exemple en cuivre, puis en aluminium, puis en alliage métallique.

Les intensités indiquées par l'ampèremètre varient d'un fil à l'autre, donc les résistances ne sont pas les mêmes : elles dépendent de la nature des conducteurs.

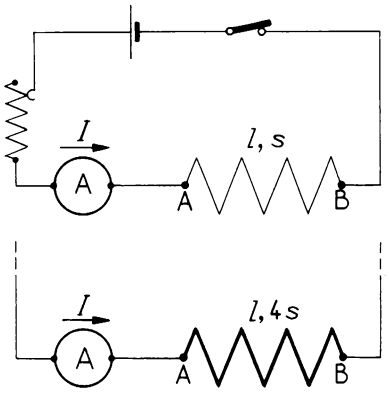



FIG. 2.

# B. — Expression de la résistance; résistivité

### 1. — RÉSISTANCE ET RÉSISTIVITÉ

Les résultats des expériences précédentes se résument ainsi :

La résistance électrique $R$ d'un fil conducteur, homogène et de section constante :

- — est proportionnelle à sa longueur $l$ ;
- — est inversement proportionnelle à sa section $s$ ;
- — dépend d'une constante physique caractéristique du conducteur, appelée sa **résistivité** $\rho$ (prononcer *rô*).

Cet énoncé se traduit par la relation: $R = \rho \frac{l}{s}$.

$R$ s'exprime en ohms, et si l'on exprime $l$ en mètres et $s$ en mètres carrés (unités S. I.), on en déduit :

$\rho = R \frac{s}{l}$ avec $\rho$ en ohm . m²/m (ou en abrégé Ωm).

En conclusion :

$$\boxed{R = \rho \frac{l}{s}} \quad (1)$$

$R$ en ohm (Ω)
$l$ en mètre (m)
$s$ en mètre carré (m²)
$\rho$ en ohm-mètre (Ωm)

Par exemple, pour le cuivre :
$\rho = 1{,}6 \cdot 10^{-8}$ Ωm, à la température ordinaire.

**Unité pratique de résistivité.**

Les sections des fils usuels sont de l'ordre du millimètre carré ; les électriciens trouvent plus commode de mesurer la section $s$ en mm². Dans ce cas, en faisant dans la formule précédente $s = 1$ mm² et $l = 1$ m, nous avons $\rho = R\frac{1}{1} = R$, ce qui s'énonce :

*La résistivité d'un conducteur est numériquement égale à la résistance d'un fil de ce conducteur ayant 1 mètre de longueur et 1 mm² de section ; l'unité de résistivité est alors l'**ohm-millimètre carré par mètre*** (Ωmm²/m).

$$\boxed{R = \rho \frac{l}{s}} \quad (2)$$

$\begin{cases} R \text{ en ohm } (\Omega) \\ l \text{ en mètre (m)} \\ s \text{ en millimètre carré (mm}^2\text{)} \\ \rho \text{ en ohm-millimètre carré par mètre } (\Omega\text{mm}^2/\text{m}). \end{cases}$

Remarque.

Le nombre $s$ de l'expression (1) est $10^6$ fois plus grand que celui de l'expression (2) ; il en est de même de $\rho$.

Il est donc facile de passer de l'une à l'autre forme d'unités d'expression de la résistivité par la règle suivante :

$$\rho\ (\Omega\text{mm}^2/\text{m}) = 10^6\ \rho\ (\Omega\text{m}).$$

Exemple. — La résistivité du cuivre est :

— en Ωm : $1{,}6 \cdot 10^{-8}$ ou $0{,}016 \cdot 10^{-6}$ ;
— en Ωmm²/m : $0{,}016$ .

## 2. — MESURE DE LA RÉSISTIVITÉ D'UN FIL CONDUCTEUR

Pour fixer les idées, soit un fil de cuivre de longueur $l = 1$ mètre, de diamètre mesuré au palmer $d = 1{,}36$ millimètre, à la température de 22° C.

La mesure de sa résistance par la méthode de comparaison (1) a donné $R = 0{,}012\,\Omega$.

$$s = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3{,}14 \times (1{,}36)^2}{4} = 1{,}427 \text{ mm}^2$$

$$l = 1 \text{ mètre}$$

$$\rho = \frac{Rs}{l} = \frac{0{,}012 \times 1{,}427}{1} \approx 0{,}017 \ \Omega\text{mm}^2/\text{m}.$$

De même, pour le nickel-chrome du § A 2 :

$$\rho = \frac{5{,}2 \times 0{,}204}{1} = 1{,}06 \ \Omega\text{mm}^2/\text{m}.$$

---

(1) Leçon VIII, § D et leçon X, Pb n° 11.

### 3. — LA RÉSISTIVITÉ VARIE AVEC LA TEMPÉRATURE

*a*) **Expérience.**

Donnons à un fil de cuivre de 50 centimètres de longueur et 0,56 mm de diamètre la forme d'un boudin (fig. 3) en l'enroulant autour d'une tige cylindrique ; on le fait traverser par un courant de 0,2 ampère en le connectant à une source de 6 volts à travers un rhéostat de 30 ohms. A froid, la tension aux bornes du fil est de 7,5 mV ; dans la flamme d'un bec Bunsen, et en enlevant le fil rougi avant fusion, la tension monte à 30 mV : la résistance est donc devenue $\frac{30}{7,5} = 4$ fois plus grande.

Les dimensions $l$ et $s$ du fil ayant peu varié, c'est que sa résistivité a augmenté.

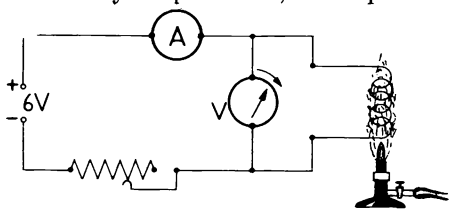



FIG. 3. — La déviation du millivoltmètre augmente lorsque la température du fil s'élève.

*b*) **Coefficient de température de la résistivité du cuivre.**

L'augmentation moyenne par degré, entre la température ordinaire et la température du rouge est d'environ 0,004 de sa valeur à 0° C.

Si la résistivité est $\rho_0$ à 0° C, à $t°$ elle augmente de 0,004 $\rho_0 t$ et devient

$$\rho_t = \rho_0 + 0{,}004\ \rho_0 t$$

soit

$$\rho_t = \rho_0\ (1 + 0{,}004\ t).$$

Le coefficient 0,004 se nomme *coefficient de température de la résistivité* du cuivre ; il se représente par la lettre $a$. D'où l'expression générale :

$$\boxed{\rho_t = \rho_0\ (1 + at)} \qquad (3)$$

$a$ dépend de la *nature* du conducteur (tableau § 4).

*c*) **Coefficient de température de la résistance.**

A la température $t$, les relations (1) et (2) s'écrivent en négligeant la dilatation :

$$R_t = \rho_t \frac{l}{s} = \rho_0\ (1 + at)\ \frac{l}{s} = R_0\ (1 + at).$$

Le coefficient de température de la résistance est alors égal à celui de la résistivité ; lorsqu'on tient compte de la dilatation du fil, on trouve une valeur très peu différente.

VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE.

Le fil étant maintenant plongé dans un verre en pyrex rempli d'huile, on trouve pour $I = 0{,}20$ ampère, les tensions $U_{20} = 7{,}5$ mV à 20° C et $U_{100} = 10$ mV à 100° C.

Les résistances sont donc : $R_{20} = \frac{U_{20}}{I} = 37{,}5$ m$\Omega$ et $R_{100} = \frac{U_{100}}{I} = 50$ m$\Omega$,

d'où la valeur moyenne de $a$ entre 20 et 100° C :

$$a = \frac{R_{100} - R_{20}}{R_{20}\ (100 - 20)} = \frac{50 - 37{,}5}{37{,}5 \times 80} = 0{,}004.$$

*d*) Ce phénomène explique que la résistance d'une lampe à filament de tungstène soit 8 à 12 fois plus grande en fonctionnement (vers 2 500 °C) qu'à froid ; d'où une brève surintensité à l'allumage.

## 4. — EXEMPLES DES VALEURS DE RÉSISTIVITÉ ET DE COEFFICIENTS DE TEMPÉRATURE POUR QUELQUES CORPS USUELS

| | *Nature du conducteur.* | *Composition en %.* | *Résistivité à 0° C* $\Omega mm^2/m$. | *Coefficient de température entre 0° C et 100° C.* |
|---|---|---|---|---|
| *Métaux purs..* | argent | | 0,015 | 0,0045 |
| | cuivre | | 0,016 | 0,0040 |
| | aluminium | | 0,027 | 0,0045 |
| | tungstène | | 0,056 | 0,005 |
| | fer | | 0,096 | 0,006 |
| *Alliages métalliques* ..... | laiton | Cu : 60 à 70<br>Zn : 30 à 40 | 0,05 à 0,1 | 0,0015 |
| | maillechort | Cu : 60<br>Zn : 25<br>Ni : 15 | 0,30 | 0,00035 |
| | manganine | Cu : 85<br>Mn : 11<br>Ni : 4 | 0,42 | 0,00002 |
| | constantan | Cu : 60<br>Ni : 40 | 0,50 | 0,00001 |
| | ferronickel | Fe : 75<br>Ni : 25 | 0,80 | 0,00090 |
| | nickel-chrome | Ni : 65<br>Fe : 23<br>Cr : 12 | 1,10 | 0,00017 |
| *Métalloïde* ... | carbone, graphite | | 50 | — 0,0004 |
| *Solutions d'acides, de sels ou de bases....* | solution d'acide sulfurique | $H^2O$<br>$H^2SO^4$ (10 %) | $0,0260 . 10^6$ | — 0,016 |
| | Solution de soude | $H^2O$<br>$H^2SO^4$ (10 %) | $0,0320 . 10^6$ | — 0,020 |

De ce tableau nous tirons les observations suivantes :

— Les métaux purs sont des conducteurs dont la résistivité est faible et augmente beaucoup avec la température : les filaments de tungstène des lampes électriques sont environ 12 fois plus résistants à leur température de fonctionnement normal (2 600° C) qu'à la température ordinaire.

— Les alliages ont une résistivité plus grande ; l'influence de la température y est beaucoup moins sensible. L'augmentation de résistivité et de résistance en fonction de la température est très faible ou nulle pour la manganine et le constantan.

— Les solutions ont un coefficient de température négatif et une résistivité très grande.

— Le graphite a une résistivité qui décroît avec la température ; il sera recherché, pour ce fait, dans la réalisation d'électrodes de voltamètre, de lampes à arc, de parafoudres.

Remarque. — **Les semi-conducteurs** (silicium, germanium...) utilisés en électronique sont des solides peu conducteurs dont la résistivité :

— varie en sens inverse de la température ;

— est beaucoup plus grande que celle des métaux et de leurs alliages : de l'ordre de 0,1 Ωm lorsqu'ils sont dopés en vue des applications (*voir* fasc. IV, p. 137).

# C. — Applications

**1. — Réglage de l'intensité à l'aide d'un rhéostat** (fig. 4).

Nous avons déjà eu l'occasion d'utiliser cet appareil.

On appelle rhéostat une résistance réglable : elle est constituée d'un fil de résistivité élevée, enroulé sur un cylindre isolant; le déplacement d'un frotteur par l'intermédiaire d'un curseur permet d'introduire une plus grande longueur de fil et par suite de réduire l'intensité du courant dans le circuit, et inversement.

Relions aux bornes d'une batterie d'accumulateurs une lampe électrique 12 V-25 W montée en série avec un rhéostat (fig. 5) ; la tension aux bornes de la batterie étant constante, nous constatons qu'en manœuvrant dans un sens, puis dans l'autre, le curseur du rhéostat, le filament de la lampe brille plus ou moins, montrant que l'intensité du courant croît ou décroît.

Il existe différents types de rhéostats (X, § E 1).

**2. — Chute de tension dans une ligne de transport de résistance totale *r*.**

Chacun des fils de ligne, tels que AB et CD (fig. 6) reliant la source à l'utilisation possède une résistance $\frac{r}{2}$ ; quand un courant $I$ les traverse, il y a entre les extrémités de chacun d'eux une différence de potentiel $\frac{r}{2} I$ ; la *chute de tension* dans la ligne est :

$$u = rI.$$

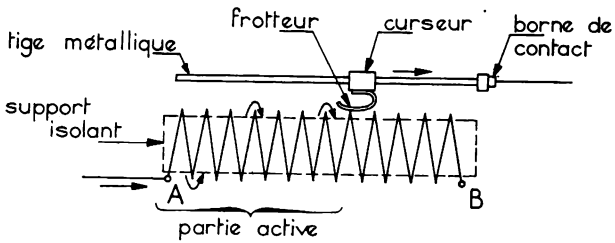



FIG. 4. — Schéma d'un rhéostat.

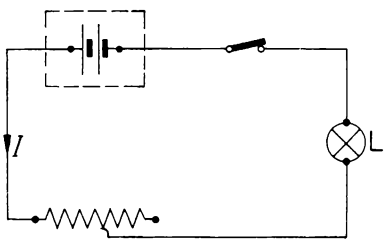



FIG. 5.

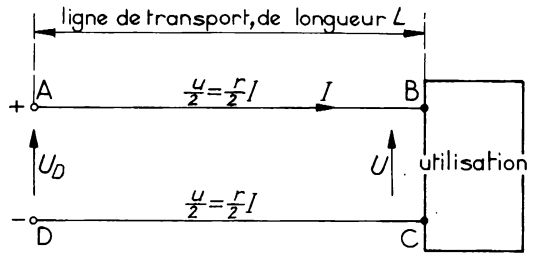



FIG. 6. — La tension aux bornes de l'utilisation est égale à la tension au départ de la source diminuée de la chute de tension dans les fils de ligne.

Les deux fils AB et CD étant en série avec l'utilisation, on a, puisque la tension totale est la somme des tensions partielles :

$$\frac{u}{2} + U + \frac{u}{2} = U_D$$

$$\text{ou } U + u = U_D.$$

Il faut donc dans une installation :

— prévoir, au départ de la ligne, une tension supérieure à la tension d'utilisation ;

— utiliser des lignes de très faible résistance pour diminuer la chute de tension.

# D. — Exercices résolus

**1.** *Un récepteur thermique porte, sur sa plaque signalétique : 220 V-3 000 W ; il est constitué d'un fil résistant de diamètre 1 millimètre et d'une longueur de 10 mètres. Calculer :*

1° *La résistance de l'élément chauffant.*

2° *Sa résistivité.*

**Solution.**

1° Résistance :

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{(220)^2}{3\,000} \approx 16{,}1\ \Omega.$$

2° Résistivité :

En exprimant $R$ en ohms, $l$ en mètre, $s$ en m², nous aurons $\rho$ en $\Omega m^2/m$.

La section est : $s = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3{,}14}{4} \times \left(\frac{10}{10}\right)^2 = 0{,}785\ mm^2 = 0{,}785 \cdot 10^{-6}\ m^2$

$$\rho = \frac{R \cdot s}{l} = \frac{16{,}1 \times 0{,}785 \times 10^{-6}}{10} \approx 1{,}27 \cdot 10^{-6}\ \Omega m^2/m$$

*Remarque.* — On aurait pu faire le calcul en exprimant :

$R$ en ohms, $l$ en mètre, $s$ en mm² ; on aurait $\rho$ en $\Omega mm^2/m$

$$\rho = \frac{16{,}1 \times 0{,}785}{10} \approx 1{,}27\ \Omega mm^2/m.$$

**2.** *Un enroulement est constitué d'un fil résistant dont la résistance a été trouvée égale à 290 Ω à la température de 18° C. Calculer sa résistance à 50° C.*

*On donne le coefficient de température du fil :* a = 0,004.

**Solution.**

Calcul de la résistance de l'enroulement à 0° C :

$$R_0 = \frac{R_{18}}{1 + at} = \frac{290}{1 + 0{,}004 \times 18} \approx 270\ \Omega.$$

Résistance à la température de 50° :

$$R_{50} = R_0\ (1 + at)$$
$$= 270\ (1 + 0{,}004 \times 50) = 324\ \Omega.$$

**3.** *Une ligne de résistance totale* $r = 0{,}50\ \Omega$ *à 20 °C, est alimentée sous la tension* $U_D = 220\ V$ *et transporte un courant* $I = 40\ A$.

1° *Quelle est la puissance des récepteurs branchés en bout de ligne?*

2° *Quelle est, en pour-cent, l'augmentation relative de la résistance de la ligne lorsque sa température atteint 40 °C? Coefficient de température :* $a = 4{,}5 \cdot 10^{-3}$.

**Solution.**

1° Chute en ligne :

$$u = rI = 0{,}50 \times 40 = 20 \text{ V}.$$

Tension à l'arrivée :

$$U = U_D - u = 220 - 20 = 200 \text{ V}.$$

Puissance absorbée par les récepteurs :

$$P = UI = 200 \times 40 = 8\,000 \text{ W ou } 8 \text{ kW}.$$

2° Un calcul analogue à celui de l'exercice précédent donne :

$$\frac{r_{40} - r_{20}}{r_{20}} = \frac{1 + 40a}{1 + 20a} - 1 = \frac{20a}{1 + 20a} = 0{,}083 \text{ ou } 8{,}3\ \%.$$

## PROBLÈMES DE LA LEÇON IX

**1.** Un pont de Wheatstone est monté comme l'indique le schéma ; trois résistances connues : $a$, $b$ fixes, $R$ variable, une résistance inconnue $x$ constituée par une plaquette rectangulaire de tôle au silicium dont les dimensions sont les suivantes : longueur $L = 0{,}20$ mètre ; largeur $l = 20$ millimètres ; épaisseur $e = 0{,}5$ millimètre.

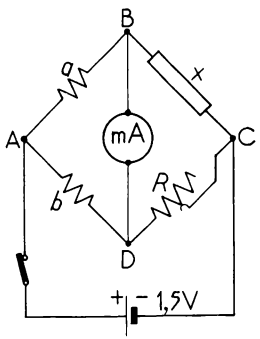



FIG. Pb 1.

*a*) A l'équilibre du pont : $a = \frac{1}{10}\ \Omega$ ; $b = 10\,\Omega$ ; $R = 1{,}1\ \Omega$.

Calculer $x$.

*b*) En déduire la résistivité $\rho$ de la tôle au silicium.

**Réponses : a)** $R = 0{,}011\ \Omega$**; b)** $\rho = 0{,}55 \cdot 10^{-6}\ \Omega$m **ou 0,55** $\Omega\,\text{mm}^2/\text{m}$.

**2.** Calculer la résistance électrique par kilomètre de longueur d'un câble aérien de transport d'énergie électrique, de diamètre $d = 20$ millimètres et réalisé en aluminium de résistivité $\rho = 2{,}6 \cdot 10^{-8}\ \Omega$m.

**Réponse :** $R = 0{,}083\ \Omega$.

**3.** Une ligne de longueur $l = 760$ mètres est formée de deux fils identiques $A_1B_1$, $A_2B_2$ de section constante. Un court circuit s'étant produit, on veut le localiser par sa distance $x$ à $A_1$ et $A_2$ : pour obtenir la même intensité $I$, il faut alimenter par les tensions $U_1$, entre $A_1$ et $A_2$, $U_2$ entre $B_1$ et $B_2$.

1° Donner la relation en fonction des tensions et de la longueur $l$, permettant de définir le point de court-circuit.

2° *Application numérique :* $l = 760$ mètres ; $U_1 = 0{,}8$ volt ; $U_2 = 0{,}7$ volt.

Calculer $x$.

**Réponses : 1°** $x = l\,\frac{U_1}{U_1 + U_2}$**; 2°** $x \approx 405$ **mètres.**

**4.** La résistance électrique d'un circuit de génératrice à la température ambiante $\theta = 20$ °C est mesurée : $r = 0{,}27$ ohm. Que devient cette résistance en régime de fonctionnement si la température atteint 90 °C ? Coefficient de température de la résistance : $a = 0{,}004$.

**Réponse : $r_{90} = 0{,}346 \approx 0{,}35$ ohm.**

**5.** Un groupement de récepteurs absorbant une puissance $P = 142$ kW est alimenté sous 1 500 volts par une ligne bifilaire à partir d'une sous-station située à 900 mètres. Calculer, sachant que la perte en ligne est 5 % de la puissance utile :

1° Le diamètre des fils de la ligne en aluminium de résistivité $\rho = 2{,}6 \cdot 10^{-8}$ Ω m.

2° La tension $U_d$ au départ de la sous-station.

**Réponses : 1° $d = 8{,}7$ mm ; 2° $U_d = 1\,575$ V.**

**6.** Un fer à repasser électrique porte, sur sa plaque signalétique, les indications : 360 watts ; 120 volts.

*a*) Quelle est l'intensité $I$ du courant dans le fer en régime normal ?

*b*) Quelle est alors sa résistance $R$ à chaud ?

*c*) Quelle est l'énergie dépensée $W$ en 2 heures d'utilisation ?

*d*) La résistance chauffante du fer est un ruban plat d'un alliage nickel-chrome de résistivité égale à 110 microhms-centimètre et dont la section rectangulaire mesure 0,9 millimètre sur 1,1 millimètre. Quelle est sa longueur $l$ ?

*e*) Établir une relation qui donne la résistance $R$ en fonction de la puissance et de la tension.

*f*) On change la résistance chauffante pour utiliser le fer sous une tension de 220 volts ; la puissance consommée étant toujours 360 watts, calculer la nouvelle résistance $R'$ par la formule établie précédemment.

*(Extrait B. E. I., Dijon.)*

**Réponses : $I = 3$ A ; $R = 40$ Ω ; $W = 0{,}72$ kWh ; $l = 36$ m ; $R = \frac{U^2}{P}$ ; $R' = 134{,}4 \approx 134$ Ω.**

**7.** Une lampe à incandescence de 60 watts est alimentée par une prise de courant sous tension constante $U = 120$ volts.

1° Calculer l'intensité $I$ du courant ainsi que la résistance $R$ du filament.

2° Quelle est, en kilowattheure, la consommation $W$ de cette lampe en une année de 365 jours, la lampe restant allumée en moyenne 4 heures par jour ?

3° En combien de temps la chaleur dégagée par la lampe échaufferait-elle 1 litre d'eau de 18,2 °C à 29 °C ? On admettra que, par suite des pertes de chaleur, 1 joule élève seulement de 0,2 °C la température de 1 gramme d'eau.

4° Le filament, enroulé en spirale, est un fil cylindrique, ayant pour résistivité $314 \cdot 10^{-8}$ ohm-mètre à la température de fonctionnement de la lampe et pour diamètre 0,1 millimètre. Calculer sa longueur.

*(Concours admission 1967 à E. E. M., Saint-Cyr ; option Histoire et Géographie.)*

**Réponses : 1° $I = 0{,}5$ A ; $R = 240$ Ω ; 2° $W = 87{,}6$ kWh ; 3° $t = 15$ mn ; 4° $l = 60$ cm.**

# X. — GROUPEMENT DES RÉSISTANCES

**MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL :**

— source de courant (12 V) ;
— résistances diverses en fil (type Alter), à décades, à fiches ;
— résistances utilisées en radioélectricité, avec code des couleurs ;
— ampèremètres ;
— voltmètres ;
— rhéostat à curseur ;
— rhéostat à plots et à lampes ;
— divers shunts d'ampèremètre.

## A. — Groupement; résistance équivalente

### 1. — Rappels.

Les définitions concernant les groupements de récepteurs et les résultats obtenus (p. 44, 48, 69) s'appliquent en particulier aux résistances :

— Des résistances *en série* (fig. 1) sont parcourues par le même courant $I$ et la tension totale $U$ est égale à la somme des tensions aux bornes de ces résistances :

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots \qquad (1)$$

— Des résistances *en parallèle* (fig. 2) sont soumises à la même tension $U$ et le courant principal est égal à la somme des courants dérivés :

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots \qquad (2)$$

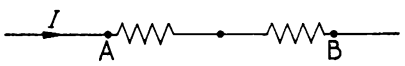



FIG. 1. — **Résistances en série** : un même courant parcourt ces deux résistances.

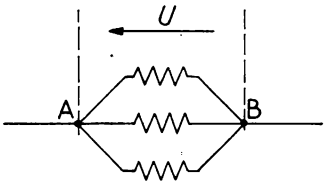



FIG. 2. — **Résistances en parallèle** : une même tension est appliquée aux bornes communes des résistances.

### 2. — Définition de la résistance équivalente à un groupement.

C'est la résistance $R$ qui, sous la même tension que le groupement, serait parcourue par le même courant. Avec la notation ci-dessus :

$$R = \frac{U}{I}. \qquad (3)$$

REMARQUES.

1. Cette définition s'applique à un groupement quelconque (en particulier mixte, § D).

2. Le remplacement d'un groupement par sa résistance équivalente n'apporte aucune modification de tension ni de courant dans le reste du circuit.

# B. — Groupement en série

Pour fixer les idées, nous considérons trois résistances $R_1$, $R_2$, $R_3$ (fig. 3), mais les résultats sont valables pour un nombre quelconque.

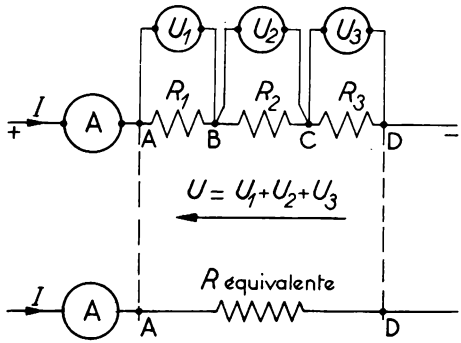



FIG. 3 : $R$ équivalente produit le même effet que la somme des résistances $R_1 + R_2 + R_3$ en série : $R = R_1 + R_2 + R_3$.

### 1. — La résistance équivalente est égale à la somme des résistances.

En effet remplaçons, dans l'égalité 1, $U_1 = R_1 I$, $U_2 = R_2 I$, etc. :

$$U = R_1 I + R_2 I + R_3 I$$

$$U = (R_1 + R_2 + R_3)\, I.$$

En comparant à la définition (3) de $R$ :

$$\boxed{R = R_1 + R_2 + R_3} \qquad (4)$$

*Des résistances en série s'ajoutent.*

La résistance équivalente à des résistances en série est donc plus grande que la plus grande de ces résistances.

### 2. — Les tensions sont proportionnelles aux résistances correspondantes.

Exprimons le courant $I$ en appliquant la loi d'Ohm à toutes les résistances :

$$I = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U_3}{R_3} = \frac{U}{R}$$

$U_1$, $U_2$, $U_3$, $U$ sont proportionnelles respectivement à $R_1$, $R_2$, $R_3$, $R$.
En outre :

$$U_1 = \frac{R_1}{R}\, U = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3}\, U ;\ U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3}\, U \ \ldots$$

La tension totale $U$ se partage proportionnellement aux résistances $R_1$, $R_2$ ...

### 3. — Cas particulier de *n* résistances égales *r* en série.

D'après l'expression 4 : $R = nr$.

La tension aux bornes d'une résistance est $\frac{U}{n}$.

# C. — Groupement en parallèle

Par exemple, trois résistances $R_1$, $R_2$, $R_3$ (fig. 4).

### 1. — Expression de la résistance équivalente.

Dans l'égalité 2 (p. 97), remplaçons $I_1 = \frac{U}{R_1}, I_2 = \frac{U}{R_2} \ldots$ :

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right) U.$$

En comparant à la définition 3 ($I = \frac{1}{R} U$), on trouve :

$$\boxed{\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} \qquad (5)$$

*L'inverse de la résistance équivalente est égale à la somme des inverses des résistances en parallèle.*

La résistance équivalente est plus petite que la plus petite des résistances.

REMARQUE. L'inverse d'une résistance est appelée *conductance* ($G$). L'unité de conductance est le *siémens* (S) ou A/V ; par exemple une résistance $R = 1$ kΩ a pour conductance $10^{-3}$ S ou 1 mA/V. La relation ci-dessus s'écrit :

$$G = G_1 + G_2 + G_3.$$

Des conductances en parallèle s'ajoutent (Théorème des conductances).

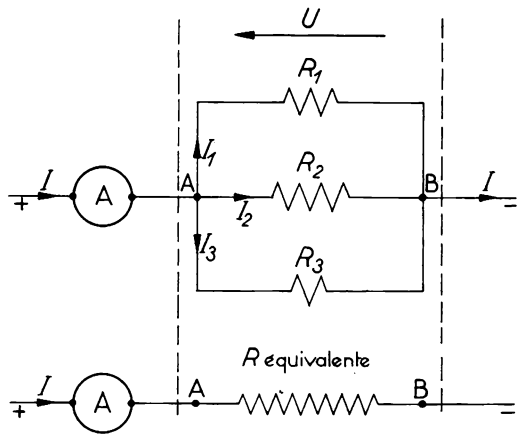



FIG. 4 : $R$ équivalente produit le même effet que les résistances $R_1$, $R_2$, $R_3$ en parallèle :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}.$$

**2. — Les courants dérivés sont inversement proportionnels aux résistances correspondantes.**

Appliquons la loi d'Ohm à chaque résistance ; nous avons :

$$I_1 = \frac{U}{R_1} \qquad I_2 = \frac{U}{R_2} \qquad I_3 = \frac{U}{R_3}$$

$$U = R_1 I_1 \qquad U = R_2 I_2 \qquad U = R_3 I_3$$

d'où $$U = R_1 I_1 = R_2 I_2 = R_3 I_3.$$

La plus grande résistance est traversée par le plus petit courant.

**3. — Cas particulier de deux résistances en parallèle** (fig. 5) **:**

*a*) *Résistance équivalente :*

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Cette relation peut encore s'écrire, après réduction au même dénominateur :

$$\frac{1}{R} = \frac{R_2}{R_1 R_2} + \frac{R_1}{R_1 R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$$

d'où $$\boxed{R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}$$

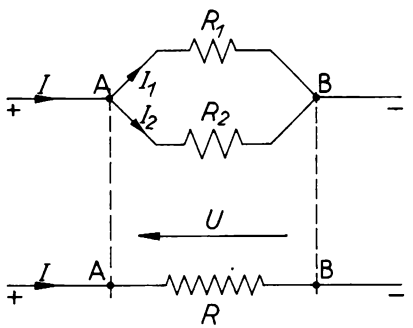



Fig. 5.

**La résistance équivalente à deux résistances en parallèle est égale au quotient de leur produit par leur somme.**

*b*) *Expressions de* $I_1$ *et* $I_2$ *en fonction du courant principal* I.

Des égalités $R_1 I_1 = R_2 I_2 = RI$, on tire :

$$I_1 = \frac{RI}{R_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I; \qquad I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I.$$

**4. — Cas particulier de *n* résistances égales *r* en parallèle.**

D'après l'expression 5 : $R = \frac{r}{n}$.

En outre, le courant dans une résistance est $\frac{I}{n}$.

# D. — Groupement mixte

**1. — C'est une association de groupements en série et de groupements en parallèle.**

L'exemple le plus simple est donc celui d'une résistance $R_1$ en série avec deux résistances $R_2$ et $R_3$ montées en parallèle (fig. 6).

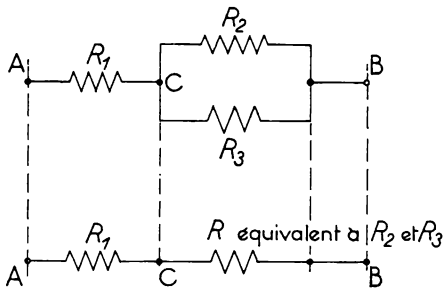



FIG. 6. — **Groupement mixte de résistances et réduction à un groupement série.**

**2. — Calcul de la résistance équivalente** (fig. 6).

La résistance équivalente $R$ est la somme de la résistance $R_1$ et de la résistance équivalente $\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$ aux deux résistances $R_2$ et $R_3$ en parallèle :

$$R = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$

RÈGLE. — *La résistance équivalente au groupement mixte est obtenue en réduisant de proche en proche les résistances en parallèle, puis en ajoutant la valeur obtenue à celle de la résistance en série et ainsi de suite.*

# E. — Applications du groupement des résistances

## 1. — RHÉOSTATS

Les rhéostats sont des résistances réglables (chap. IX, § C) ; ils existent dans les types suivants :

*a*) Le **rhéostat à curseur** (fig. 7) à variation continue de la résistance.

*b*) Le **rhéostat à plots** (fig. 8).

Une manette centrale mobile assure le contact entre le circuit et divers plots disposés circulairement, introduisant ainsi des groupes de résistances *en série;* la variation de la résistance est discontinue.

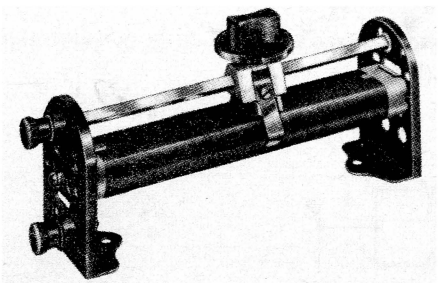


FIG. 7. — **Rhéostat à curseur.** *(Document S.O.F.A.I.R.-A.D.B.)*

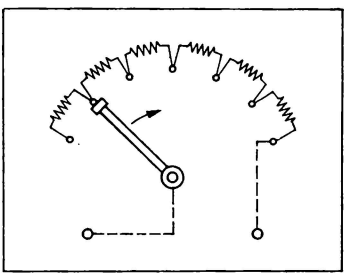


FIG. 8. — **Schéma d'un rhéostat à plots.**

*c*) Le **rhéostat de lampes** (fig. 9).

Il est constitué par des lampes à filament incandescent, montées *en dérivation* ; chaque lampe mise en circuit par la fermeture de son interrupteur diminue la résistance équivalente à l'ensemble ; le courant augmente dans le circuit principal.

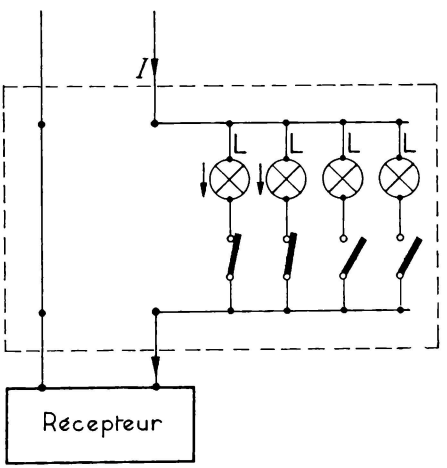



FIG. 9. — **Rhéostat de lampes.**

## 2. — SHUNT D'AMPÈREMÈTRE

Les ampèremètres ne peuvent supporter que des intensités limitées, en général quelques ampères; pour mesurer les intensités supérieures, on leur associe des **shunts.**

Un shunt est une résistance calibrée, faible, intercalée dans le circuit à mesurer, aux bornes de laquelle l'ampèremètre est monté en parallèle (fig. 10).

Le courant $I$ à mesurer se partage en :

— une fraction faible $i$ qui traverse l'appareil de mesure ;

— une fraction importante $I—i$ qui traverse le shunt.

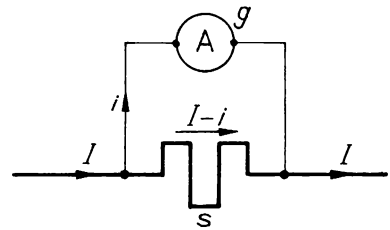



FIG. 10. — **Représentation graphique et montage d'un shunt.** *g* est l'initiale de *g*alvanomètre, appareil de mesure des très petits courants.

EXEMPLE. — *Soit un milliampèremètre dont la déviation totale est obtenue lorsqu'il est traversé par le courant* i = 0,01 *ampère; sa résistance interne est* g = 10 *ohms. Quelle est la résistance* s *du shunt à lui associer pour obtenir un ampèremètre de calibre* 100 *ampères ?* (fig. 11).

Pour la déviation totale, le courant principal est $I = 100$ ampères; il se partage en :

$i = 0{,}01$ ampère dans l'appareil de mesure ;

$I—i = 99{,}99$ ampères dans le shunt $s$.

Puisque les résistances et les intensités correspondantes sont inversement proportionnelles entre elles :

$$gi = s\,(I - i)$$

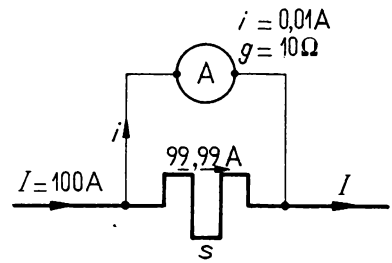



FIG. 11. — Calcul d'un shunt : exemple.

d'où
$$s = g\,\frac{i}{I - i} = 10\,\frac{0{,}01}{99{,}99} = \frac{1}{999{,}9} \approx \frac{1}{1\,000}\ \Omega$$

Le shunt a multiplié les possibilités de l'appareil par : $m = \frac{I}{i} = \frac{100}{0{,}01} = 10\,000$ ;

$m = \frac{I}{i}$ est le *pouvoir multiplicateur du shunt.*

Avec le même milliampèremètre et des shunts pour 5, 10, 50, 100 ampères, on peut mesurer tous les courants usuels.

Les milliampèremètres actuels de type à cadre mobile (1) ou électromagnétique sont réglés pour donner leur déviation totale soit avec 0,1 volt à leurs bornes, soit avec 0,3 volt à leurs bornes : les shunts qui leur correspondent sont dits *shunt à* 0,1 *volt* ou *shunt à* 0,3 *volt.*

Ils sont en général à plusieurs calibres, par exemple (fig. 15) : 0,1 mA; 1 mA; 10 mA; 0,1 A; 1 A; 10 A, obtenus par des shunts internes; pour mesurer les intensités supérieures à 10 A, on utilise des shunts extérieurs (fig. 12).

(1) Les ampèremètres utilisent les forces exercées par un aimant sur un courant (Fascicule II); leur déviation est proportionnelle au courant.

**Construction :** Un shunt est réalisé pratiquement par une barrette de maillechort avec des extrémités en laiton ; deux bornes sont disposées à chacune d'elles : l'une où est fixé le fil de ligne, l'autre pour la connexion au milliampèremètre (fig. 12). Des traits de scie alternés ont permis d'ajuster le shunt à la résistance voulue.

**Utilisation :** Soient un ampèremètre dont le cadran comporte 100 divisions et l'un de *ses* shunts marqué 50 A — 0,1 V. Cette indication signifie que lorsque l'ampèremètre fonctionne sur ce shunt, la déviation totale correspond à un courant $I = 50$ A dans le circuit ; une division vaut $\frac{50}{100} = 0{,}5$ A.

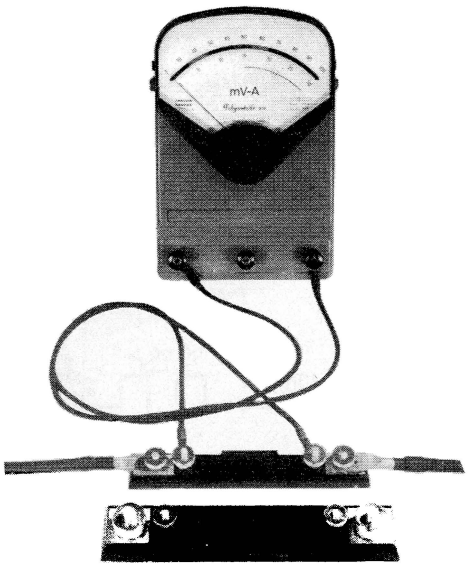



FIG. 12. — **Shunt externe de 50 A ; 0,1 V.**
*(Document Chauvin-Arnoux.)*

### 3. — POTENTIOMÈTRE

Lorsque l'on veut appliquer à un récepteur une tension déterminée, on utilise un **potentiomètre** ; le montage est dit *potentiométrique* (fig. 13). On applique la tension d'alimentation à la totalité de la résistance AB d'un rhéostat, et on branche le récepteur entre une des bornes et le curseur C ; en déplaçant celui-ci de A vers B, la tension appliquée au récepteur croît de la valeur zéro à sa valeur maximale appliquée entre A et B.

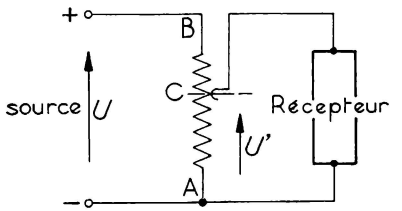



FIG. 13. — **Montage potentiométrique.**

### 4. — VOLTMÈTRE A PLUSIEURS SENSIBILITÉS

Un **voltmètre** est un appareil qui sert à mesurer une différence de potentiel (ou tension électrique). C'est un milliampèremètre, parfois un microampèremètre, muni d'une grande résistance additionnelle en série.

Un voltmètre, branché *en dérivation* entre deux points d'un circuit, est donc traversé par un très petit courant et ne modifie pratiquement pas la tension à mesurer (fig. 14 *a*).

Donnons un exemple :

*Un milliampèremètre à cadre mobile qui dévie des 150 divisions du cadran pour un courant de 10 milliampères. La résistance* r *du cadre et de ses accessoires étant 10 ohms, on veut en faire un voltmètre de calibres 150 V, 75 V, 15 V, 3 V* (fig. 14 *b*).

— Calibre 150 V.

La déviation doit être totale pour 150 volts et un courant de 0,01 ampère; cela entraîne pour le circuit du voltmètre une résistance :

$$R = \frac{150}{0{,}01} = 15\,000\ \Omega.$$

La résistance additionnelle devra être :

$$R_{add} = R - r = 15\,000 - 10 = 14\,990\ \Omega.$$

L'ensemble ampèremètre plus résistance additionnelle constitue maintenant un voltmètre de calibre 150 volts, avec comme coefficient de lecture : 1 division égale 1 volt.

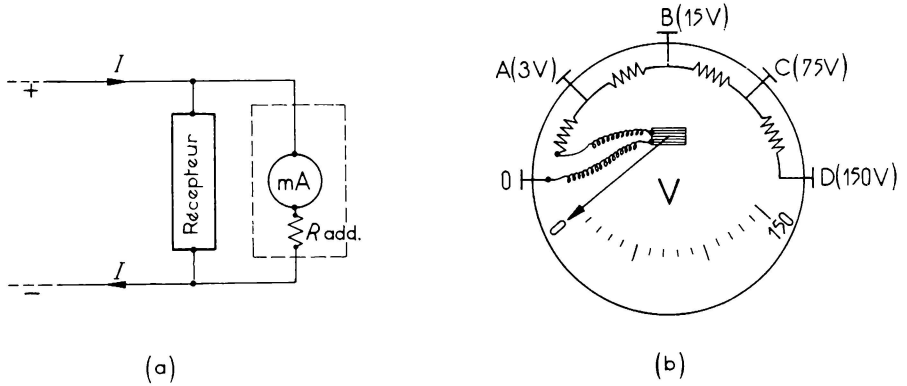



FIG. 14. — *a)* Un voltmètre est un milliampèremètre auquel on ajoute une résistance additionnelle, calculée en fonction du calibre désiré. *b)* Exemple de voltmètre à quatre calibres ou sensibilités.

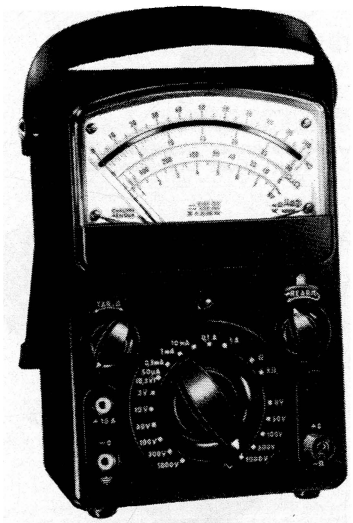


FIG. 15. — **Appareil de mesure servant d'ampèremètre, de voltmètre et d'ohmmètre,** sur différentes sensibilités.

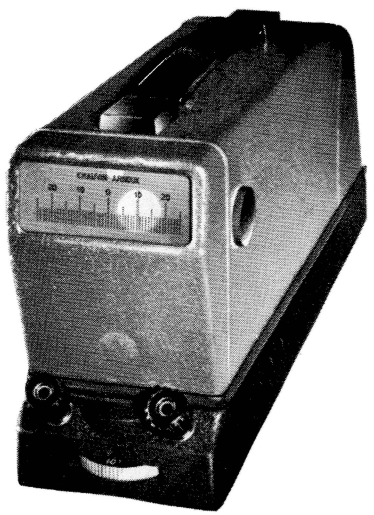


FIG. 16. — **Galvanomètre.** Ce type est utilisé surtout comme appareil de zéro (*exemple* : problème 5, p. 86).

*(Documents Chauvin-Arnoux.)*

— Calibre 75 V.

On doit avoir de même : déviation totale pour 75 volts et un courant de 0,01 ampère. La résistance du circuit du voltmètre est alors :

$$R = \frac{75}{0{,}01} = 7\,500\ \Omega.$$

La résistance additionnelle nécessaire sera :

$$R_{add} = R - r = 7\,500 - 10 = 7\,490\ \Omega.$$

L'ensemble ampèremètre plus résistance additionnelle constitue un voltmètre dont le coefficient de lecture est : 1 division égale 0,5 V.

— Calibres 15 V, 3 V.

Un calcul analogue donne une résistance additionnelle de 1 490 ohms pour 15 volts ; et une résistance additionnelle de 290 ohms pour 3 volts :

Calibre 15 V : 1 division égale 0,1 volt.
— 3 V : — — 0,02 —

Notons que les voltmètres modernes sont à très grande résistance interne : 10 000 Ω/V et même 20 000 Ω/V.

## 5. — RÉSISTANCES FIXES

On distinguera :

— **les résistances d'usage courant** (fig. 17) à fil en alliages divers, montées sur cylindre isolant ;

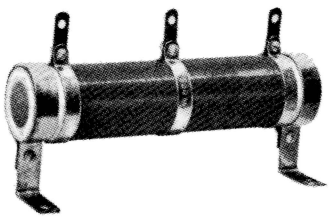


FIG. 17. — **Résistance usuelle.**
*(Document S.O.F.A.I.R.-A.D.B.)*

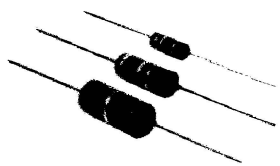


FIG. 18. — **Résistances moulées** 1/2 W ; 1 W ; 2 W du *Code international.*

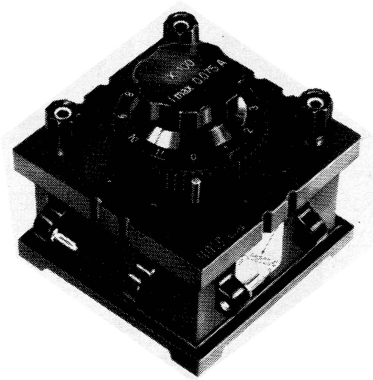
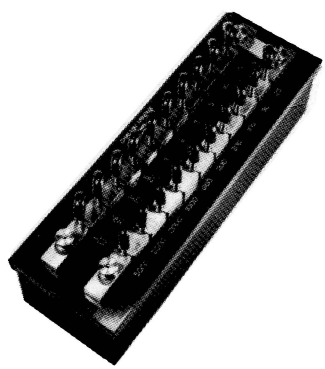


FIG. 19. — **Résistance étalon : boîte A.O.I.P.**
*(Document A.O.I.P.)*



**Boîte à fiches.**
*(Document Chauvin-Arnoux.)*

— **les résistances utilisées** particulièrement en électronique (fig. 18) ; de fortes résistances allant de quelques centaines à quelques milliers d'ohms ; de très faible encombrement — de l'ordre du centimètre — et constituées par un bâton de graphite. Un code de couleurs donne leur résistance ;

— **les résistances étalonnées** pour les mesures de précision dans les laboratoires ; ces étalons doivent garder une valeur constante. Elles existent en particulier sous forme de boîtes (fig. 19) *à décades*, de boîtes *à fiches*... Ces résistances sont faites de fils de constantan, manganine... de coefficient de température quasi nul (p. 92).

# F. — Exercices résolus

**1.** *On dispose une résistance* $R_1 = 30\ \Omega$ *en série, avec deux résistances* $R_2 = 100\ \Omega$ *et* $R_3 = 200\ \Omega$ *montées en parallèle ; la tension appliquée à l'ensemble est* $U = 145$ V. *On demande :*

1° *La résistance équivalente au groupement* (fig. 6, p. 101).

2° *L'intensité du courant dans* $R_1$.

3° *L'intensité du courant dans* $R_2$ *et dans* $R_3$.

4° *La tension aux bornes de chaque résistance.*

**Solution.**

1° Résistance équivalente à $R_2$ et $R_3$ en parallèle :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{100} + \frac{1}{200} = \frac{3}{200}$$

$$R = \frac{200}{3} = 66{,}7\ \Omega.$$

Résistance équivalente au groupement mixte $R_1$ et $R_2$, $R_3$ :

$$R_e = R_1 + R = 30 + 66{,}7 = 96{,}7\ \Omega.$$

2° Intensité du courant dans $R_1$ ou courant principal :

$$I = \frac{U}{R_e} = \frac{145}{\frac{290}{3}} = \frac{145 \times 3}{290} = 1{,}5\ \text{A}.$$

3° Intensité du courant dans $R_2$ :

$$I_2 = I\,\frac{R_3}{R_2 + R_3} = 1{,}5\,\frac{200}{300} = 1\ \text{A}.$$

Intensité du courant dans $R_3$ :

$$I_3 = I\,\frac{R_2}{R_2 + R_3} = 1{,}5\,\frac{100}{300} = 0{,}5\ \text{A}.$$

4° Tension aux bornes de $R_2$ et $R_3$ .

$$U_{CB} = 200 \times 0{,}5 = 100\ \text{V}$$

ou encore : $100 \times 1 = 100$ V.

Tension aux bornes de $R_1$ :

$$U_{AC} = 30 \times 1{,}5 = 45\ \text{V}.$$

**2.** *Trois résistances égales* R *sont montées en triangle ; entre deux sommets, on mesure une résistance* $r = 10$ *ohms. Quelle est la valeur de chaque résistance* R *?*

**Solution.**

Entre deux sommets, par exemple A et C (fig. Pb 2) on peut écrire :

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{R} + \frac{1}{2R} = \frac{3}{2R} \left( \text{ou } r = \frac{R \times 2R}{R + 2R} = \frac{2R}{3} \right)$$

soit :

$$R = \frac{3r}{2} = \frac{3 \times 10}{2} = 15 \text{ ohms.}$$

**3.** *Une lampe est marquée 12 V-15 W ; quelle doit être la résistance minimale du rhéostat de protection à monter en série avec la lampe si l'on ne dispose que d'une source constante d'alimentation* U = *120 volts ?*

**Solution.**

En régime normal de fonctionnement, l'intensité dans la lampe est :

$$I = \frac{P}{U} = \frac{15}{12} = 1{,}25 \text{ A.}$$

Le rhéostat doit donc avoir une résistance $R$ telle que :

$$R = \frac{120 - 12}{1{,}25} = \frac{108}{1{,}25} = 86{,}4 \ \Omega.$$

## PROBLÈMES DE LA LEÇON X

**1.** Sous une même tension constante $U$, on associe deux, puis trois résistances $R$, identiques, entre deux points A et B d'un circuit d'après les combinaisons des schémas suivants :

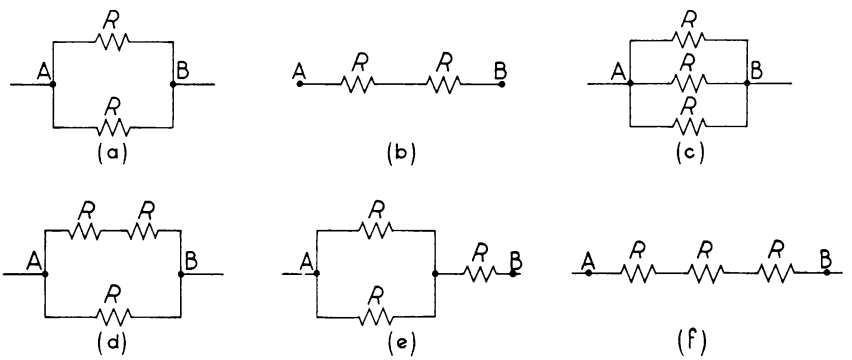



FIG. Pb 1.

1° Calculer les résistances équivalentes et les puissances dissipées.

2° *Application numérique :* $U = 12$ volts ; $R = 10$ ohms.

**Réponses : 1° a)** $\frac{R}{2}$ **; b)** $2R$ **; c)** $\frac{R}{3}$ **; d)** $\frac{2R}{3}$ **; e)** $1{,}5R$ **; f)** $3R$.

$$P = \frac{2U^2}{R} ; \ P = \frac{U^2}{2R} ; \ P = \frac{3U^2}{R} ; \ P = \frac{3U^2}{2R} ; \ P = \frac{2U^2}{3R} ; \ P = \frac{U^2}{3R}.$$

**2° a)** $P = 28{,}8$ **W ; b)** $P = 7{,}2$ **W ; c)** $P = 43{,}2$ **W ;**
**d)** $P = 21{,}6$ **W ; e)** $P = 9{,}6$ **W ; f)** $P = 4{,}8$ **W.**

**2.** Trois résistances de même valeur $R$ sont disposées en triangle de sommets A, B, C et trois résistances $r$ en étoile OA′, OB′, OC′ (fig. ci-dessous) :

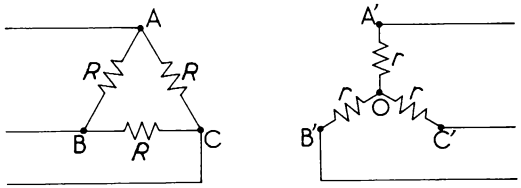



FIG. Pb 2.

*a*) Quelles sont les résistances équivalentes $R_t$ entre A et B, $R_e$ entre A′ et B′ ?

*b*) Exprimer $R$ en fonction de $r$ lorsque $R_t = R_e$.

*c*) Cette relation étant satisfaite, on applique, entre A et B et entre A′ et B′, la même tension $U$ : que peut-on dire des puissances $P_t$ et $P_e$ absorbées par le triangle et l'étoile ?

Quelle est la résistance qui dissipe le plus ?

**Réponses : a)** $R_t = \dfrac{2R}{3}$ ; $R_e = 2r$ ; **b)** $R = 3r$ ; **c)** $P_t = P_e$ ; $R$ **entre A et B.**

**3.** Une installation alimente 40 lampes à incandescence montées en dérivation. Chaque lampe, de résistance $R = 200$ ohms, absorbe un courant $I = 0{,}4$ ampère. Calculer :

— La résistance équivalente $R_e$ du groupement.
— L'intensité totale absorbée $I_t$.
— La tension $U$ aux bornes du groupement.
— La puissance totale $P_t$ absorbée par les lampes.

*(C. A. P. électrotechnique, 1965 ; Paris.)*

**Réponses :** $R_e = 5\ \Omega$ ; $I_t = 16$ **A** ; $U = 80$ **V** ; $P_t = 1\,280$ **W.**

**4.** Étant donné le schéma ci-contre ·

Calculer $U_2$ ; $I_1$ ; $I$ ; $U_1$ ; $U$ ; $R_t$ entre A et C.

*(C. A. P. électrotechnique, 1966 ; Paris.)*

**Réponses :** $U_2 = 24$ **V** ; $I_1 = 4$ **A** ; $I = 12$ **A** ; $U_1 = 96$ **V** ; $U = 120$ **V** ; $R_t = 10\ \Omega$.

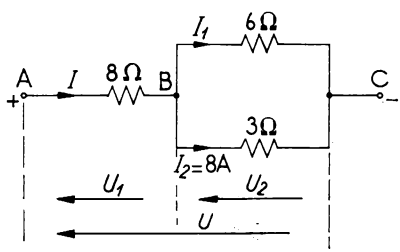



FIG. Pb 4·

**5.** Étant donné le schéma ci-dessous :

1° Exprimer la puissance totale dissipée dans les deux dérivations en fonction des constantes $I$ et $R$, et de la variable $X$ ; en déduire la courbe correspondante.

*Application numérique :* $I = 100$ ampères ; $R = 10$ ohms.

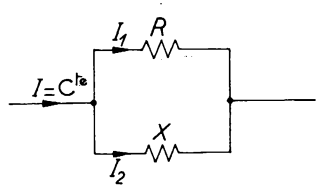



FIG. Pb 5.

2° Exprimer la puissance dissipée dans $X$ en fonction des constantes $I$ et $R$ ; en déduire la condition de la puissance maximale dans la résistance $X$, en fonction de $I$.

*Application numérique :* $I = 100$ ampères ; $R = 10$ ohms.

**Réponses : 1°** $P_t = RI^2 \dfrac{X}{X+R}$ ; **2°** $P_x = \dfrac{RI^2}{4}$.

$$P_t = 10^5 \cdot \frac{X}{X+10} ; \quad P_x = 25\,000 \text{ W}.$$

**6.** On a disposé, suivant les arêtes d'un cube, 12 résistances $r$, alimentées par une source de 10 volts branchée entre A et C.

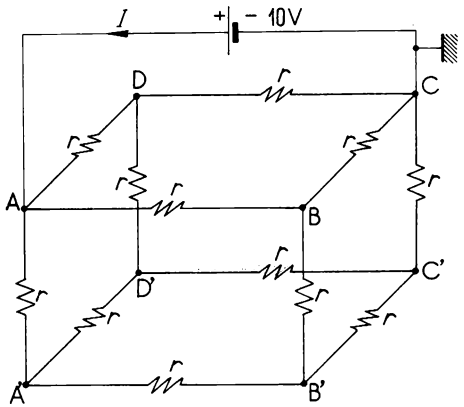



FIG. Pb 6.

1° Montrer que les points BDD'B' sont au même potentiel et donner la valeur de ce potentiel.

2° Passe-t-il un courant dans les résistances BB' ? DD' ? En passerait-il un dans un gros fil de cuivre reliant les quatre points BDB'D' ?

3° Tracer un schéma plan équivalent au montage donné et calculer sa résistance équivalente $R_e$ entre A et C.

*Application numérique :* donner la valeur de $R_e$ pour $r = 4$ ohms.

**Réponses : 1°** $V_D = V_B = V_{D'} = V_{B'} = 5$ **volts.**

**2° non ; 3°** $R_e = \dfrac{3r}{4} = 3\ \Omega$.

**7.** On dispose d'un microampèremètre de caractéristiques : 40 microampères ; 0,1 volt. On veut le transformer :

*a*) En voltmètre de calibre 10 volts ; calculer la résistance additionnelle $R_{ad}$ nécessaire.

*b*) En ampèremètre de calibre 1 ampère ; calculer la valeur du shunt $s$ à utiliser.

**Réponses : a)** $R_{ad} = 247\,500\ \Omega$ **; b)** $s \approx 0{,}10\ \Omega$.

**8.** On a réalisé, sur une ligne de distribution 240 volts, le montage suivant comprenant :

*a*) $n$ lampes $L_1$, $L_2$, $L_3$ ... $L_n$ en parallèle, de 160 ohms chacune.

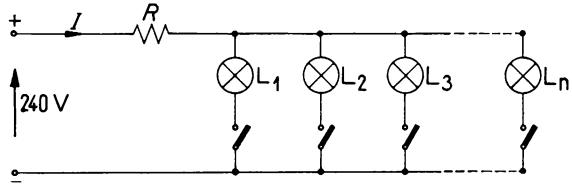



FIG. Pb 8.

*b*) Une résistance invariable $R = 40$ ohms en série, traversée par le courant total d'alimentation.

On met en service une, puis deux,..., puis $n$ lampes.

1° Donner, en fonction de $n$, la loi générale qui détermine le courant $i$ dans chaque lampe et la tension $u$ correspondante.

Pourquoi la tension $u$ aux bornes des lampes diminue-t-elle ?

2° *Application numérique :* $n = 1$ ; $n = 2$ ; $n = 3$.

**Réponses : 1°** $I = \dfrac{6\,n}{4+n}$ ; $i = \dfrac{6}{4+n}$ ; $u = \dfrac{960}{4+n}$.

**2°** $i_1 = 1{,}2$ **A ;** $u_1 = 192$ **V.**

$i_2 = 1$ **A ;** $u_2 = 160$ **V.**

$i_3 \approx 0{,}86$ **A ;** $u_3 = 137$ **V.**

**9.** Un fer à souder 30 volts-450 watts doit être utilisé avec une source de tension 120 volts. Calculer :

*a*) La valeur $R$ du rhéostat de protection à monter en série avec le fer.

*b*) La puissance totale $P_t$ absorbée.

**Réponses : a)** $R = 6\ \Omega$ **; b)** $P_t = 1800$ **W.**

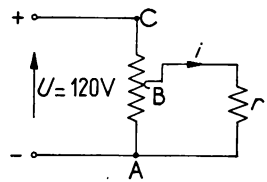



FIG. Pb 10.

**10.** A partir d'une alimentation à 120 volts, on réalise un montage potentiométrique à l'aide d'un rhéostat AC ($R = 66$ ohms) permettant d'appliquer une tension variable à un récepteur uniquement thermique $r = 110$ ohms.

Le curseur étant au point B — au tiers du rhéostat en partant de C — calculer :

*a*) L'intensité $i$ dans le récepteur.

*b*) La tension $U_r$ à ses bornes.

**Réponses : a)** $i = 0{,}64$ **A ; b)** $U_r = 70{,}6$ **V.**

**11.** Pour mesurer, par la méthode de comparaison, la résistance $x$ d'un fil de cuivre, on l'alimente en série avec un shunt de résistance $s$ et un rhéostat de protection limitant l'intensité du courant.

Un millivoltmètre placé d'abord aux bornes de $s$ dévie de $n$ divisions, puis aux bornes de $x$, de $n'$ divisions.

*a*) Quelle relation existe-t-il entre $x$, $s$, $n$ et $n'$ ?

b) *Application numérique :* $s = 0{,}01\ \Omega$ ; $n' = 56$ ; $n = 43$.

**Réponses : a)** $x = \dfrac{n'}{n}\,s$ **; b)** $x = 13\ \text{m}\Omega$.

# XI. — PROPRIÉTÉS DES GÉNÉRATEURS. GROUPEMENT

**MATÉRIEL UTILISÉ :**

— pile neuve de 4,5 V ;
— rhéostat de 62 ohms ;
— ampèremètre 5 A ;
— voltmètre calibre 6 V
— accumulateurs ;
— diverses résistances.

## A. — Types de générateurs

### GÉNÉRATEURS USUELS

Les générateurs à courant continu sont :

— les **piles** (XIV, § A) capables de transformer en énergie électrique l'énergie chimique emmagasinée dans leurs constituants ;

— les **accumulateurs** (XIV, § B) ;

— les **générateurs tournants**, appelés naguère *dynamos*, qui transforment en énergie électrique l'énergie mécanique qu'ils reçoivent d'un moteur d'entraînement.

## B. — Force électromotrice ; résistance interne

### I. — UN GÉNÉRATEUR EST CARACTÉRISÉ PAR SA FORCE ÉLECTROMOTRICE

Réalisons le montage suivant (fig. 1); en série : une pile de 4,5 volts, un rhéostat de 62 ohms, un ampèremètre, un interrupteur que l'on *fermera seulement* pendant la durée des lectures des appareils (1).

Lorsque l'interrupteur est ouvert, le générateur ne débite aucun courant : on dit *qu'il n'est pas chargé* ou qu'il est « à vide ». Le voltmètre indique 4,5 volts.

Fermons l'interrupteur, l'ampèremètre dévie ; pour cette position du curseur, et pour d'autres nouvelles positions, la tension aux bornes reste toujours inférieure à la valeur 4,5 volts ; la tension maximale, 4,5 volts, se rétablit chaque fois que l'on ouvre le circuit.

Cette tension maximale est la **tension à vide** ou **force électromotrice**, que nous noterons $E$.

(1) Pour obtenir plus facilement une bonne caractéristique en charge, il est préférable d'utiliser une pile au mercure ($E = 1{,}35$ V; $r \approx 0{,}35$ Ω). Voir dans la même collection : P. MONFORT et J. RICARD, *Manipulations d'électricité*, fasc. I, p. 47.

REMARQUE.

L'intensité du courant qui traverse le voltmètre, dont la résistance est très grande, par exemple 100 000 ohms, est, au plus :

$$i = \frac{E}{R} = \frac{4{,}5}{100\,000} = 4{,}5 \cdot 10^{-5} \text{ A ou } 45\ \mu\text{A}.$$

Elle est négligeable.

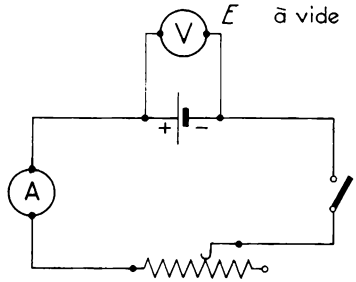



FIG. 1. — Le circuit est ouvert ; la pile indique sa *force électromotrice* $E$ ou *tension à vide*.

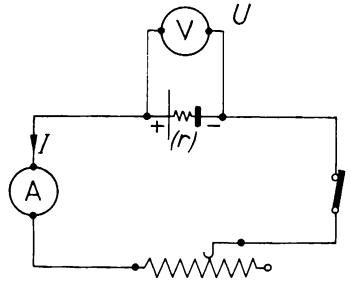



FIG. 2. — Le voltmètre V indique la tension $U$ aux bornes du générateur : $U < E$. $U$ est appliquée au circuit extérieur ou *charge* représentée par le rhéostat. $E$ — $U$ est la *chute interne*.

## 2. — UN GÉNÉRATEUR POSSÈDE UNE RÉSISTANCE INTERNE

### *a*) Résistance interne *r*.

Dans le montage de la figure 2, lorsqu'on fait varier la résistance du rhéostat de sa valeur maximale à zéro, $I$ croît et $U$ décroît. Par exemple, pour $I = 0$, on a $U = E = 4{,}5$ V, alors que pour $I = 2{,}0$ A, on lit $U = 2{,}4$ V.

Pour un débit de quelques instants, la f.é.m. $E$ demeure constante ; la tension aux bornes $U$ est appliquée au circuit extérieur : la différence $E - U = 4{,}5 - 2{,}4 = 2{,}1$ V assure donc le passage du courant à travers la pile et on l'appelle *chute interne* (de tension). La loi d'Ohm lui fait correspondre la *résistance interne* de la pile :

$$r = \frac{E - U}{I} = \frac{2{,}1}{2} = 1{,}05 \approx 1{,}1\ \Omega.$$

### *b*) Caractéristique en charge d'un générateur.

C'est le graphe des variations de la tension aux bornes $U$ en fonction du courant $I$. Au tableau des mesures ($I$ et $U$), sont ajoutés les calculs de $E - U$, $r$ et de la puissance utile $P_u = UI$, fournie à la charge.

| $I$(A) | 0 | 0,50 | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 4,0 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $U$(V) | 4,5 ($= E$) | 4,0 | 3,5 | 2,4 | 1,4 | 0,60 |
| $E - U$(V) | 0 | 0,50 | 1,0 | 2,1 | 3,1 | 3,9 |
| $r = \frac{E - U}{I}$ ($\Omega$) | | 1,0 | 1,0 | 1,05 | 1,03 | 0,98 |
| $P_u = UI$(W) | 0 | 2,0 | 3,5 | 4,8 | 4,2 | 2,4 |

On peut donc adopter $r = 1\ \Omega$. Le lecteur pourra tracer la caractéristique $U = f(I)$ (résultat p. 120). On remarque que $P_u$ passe par un maximum (calculé p. 120).

# C. — Loi d'Ohm relative à un générateur

## 1. — EXPRESSION

De la relation : $\dfrac{E - U}{I} = r$

on déduit : $E - U = rI$

ou $\boxed{E = U + rI}$ $\begin{cases} E \text{ en volt} \\ U \text{ en volt} \\ I \text{ en ampère} \\ r \text{ en ohm.} \end{cases}$

On emploie souvent cette relation sous la forme $U = E - rI$.

Cette relation est l'expression de la loi d'Ohm appliquée à un générateur, à l'intérieur du générateur, lorsqu'il débite ; $U$ est la tension aux bornes, $E$ est la force électromotrice (f. é. m. en abrégé), le produit $rI$ égal à $E - U$ étant la chute interne (§ B, 2).

## 2. — LOI D'OHM POUR UN CIRCUIT FERMÉ COMPORTANT GÉNÉRATEUR ET RÉSISTANCE MORTE (fig. 3)

La différence de potentiel $U$ étant la même à leurs bornes communes A et B, nous avons :

— aux bornes de la charge : $U = RI$

— aux bornes du générateur : $U = E - rI$.

On en déduit : $RI = E - rI$.

Soit encore : $RI + rI = E$

d'où $\boxed{E = (R + r)\, I}$ $\begin{cases} E \text{ en volt} \\ R \text{ en ohm} \\ r \text{ en ohm} \\ I \text{ en ampère.} \end{cases}$

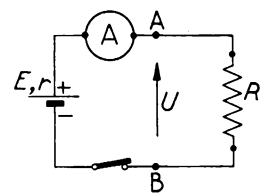



FIG. 3. — Circuit simple formé d'un générateur et d'une résistance morte (charge) : $E = (R + r)\, I$.

*Dans un circuit simple comportant un générateur et des résistances mortes en série, la f. é. m. du générateur est égale au produit de la résistance totale du circuit par l'intensité du courant qui le traverse.*

REMARQUE.

Lorsque plusieurs résistances $R_1$, $R_2$... sont groupées entre les bornes du générateur, on les remplace par leur résistance équivalente $R$ ; la relation ci-dessus reste applicable.

### 3. — DÉFINITION DE LA FORCE ÉLECTROMOTRICE E PAR LA PUISSANCE ÉLECTRIQUE DU GÉNÉRATEUR

Lorsque le circuit du générateur est fermé, les puissances électriques mises en jeu sont les suivantes :

— **La puissance utile** : $P_u = UI$.

C'est la puissance électrique que le générateur fournit au circuit extérieur ou charge.

— La puissance perdue : $p_j = rI^2$.

C'est la puissance dissipée en chaleur par le courant $I$ dans la résistance interne du générateur. C'est pourquoi le constructeur fixe une limite pour $I$.

— La puissance électrique totale $P_t$ que fournit le générateur ; elle est la somme des puissances $P_u$ et $p_j$ :

$$P_t = P_u + p_j$$
$$= UI + rI^2$$
$$P_t = (U + rI)\, I$$

soit en tenant compte de l'expression : $E = U + rI$

$$\boxed{P_t = EI} \qquad \begin{cases} P \text{ en watt} \\ I \text{ en ampère} \\ E \text{ en volt.} \end{cases}$$

Cette relation, sous la forme $E = \dfrac{P_t}{I}$, est la véritable définition de la f. é. m. d'un générateur (la définition du § B 1 n'était que provisoire et destinée à permettre l'expérimentation). Elle s'énonce de façon analogue à la définition de la tension (p. 67) :

*La force électromotrice d'un générateur est le quotient de sa puissance électrique totale par l'intensité du courant qu'il débite.*

### 4. — EXPRESSION DU COURANT DE COURT-CIRCUIT :

En réunissant par un fil de résistance négligeable devant la résistance interne $r$ les deux bornes d'un générateur, celui-ci est mis en court-circuit ; le courant de court-circuit $I_{cc}$ n'est limité que par la résistance interne $r$ :

$$I_{cc} = \frac{E}{r}.$$

$r$ est généralement assez petite pour que $I_{cc}$, très grand, détériore le générateur.

### 5. — RÉCAPITULATION DES EXPRESSIONS DU COURANT :

$$\boxed{I = \frac{E}{R + r} = \frac{U}{R} = \frac{E - U}{r}.}$$

Elles constituent le point de départ de tous les calculs. On retrouve : pour $R = 0$, $I_{cc} = \dfrac{E}{r}$ ; pour $R$ infinie (circuit ouvert), $U = E$ ; pour $R = r$, $I = \dfrac{I_{cc}}{2}$ et $U = \dfrac{E}{2}$.

### 6. — ORDRES DE GRANDEUR

Pile pour lampe de poche, transistor... $E = 4{,}5$ V ; $r = 1\ \Omega$ ; $I_{cc} = 4{,}5$ A.

Accumulateur d'automobile... $E = 6$ V ; $r = 0{,}02\ \Omega$ ; $I_{cc} = 300$ A ; si $r$ dépassait quelques centièmes d'ohms, il serait impossible d'obtenir l'intensité nécessaire au démarrage du moteur.

# D. — Rendement d'un générateur

Il faut distinguer :

**— Le rendement électrique.**

C'est le rapport de la puissance utile $P_u$ à la puissance électrique totale $P$ :

$$\eta_e = \frac{P_u}{P_t} = \frac{UI}{EI}$$

donc

$$\boxed{\eta_e = \frac{U}{E}.}$$

**— Le rendement industriel.**

C'est le rapport de la puissance utile $P_u$ à la puissance totale $P_a$ absorbée par le générateur :

$$\boxed{\eta_i = \frac{P_u}{P_a}.}$$

Cette expression sera utilisée pour les génératrices tournantes (fasc. II).

# E. — Groupement des générateurs

Des générateurs peuvent être groupés — on dit aussi *couplés* — entre eux, pour obtenir soit de plus grandes tensions, soit de plus grands courants. Nous supposerons que la résistance des connexions est négligeable devant la résistance interne des générateurs.

### 1 — Générateurs en série.

Lorsque le pôle négatif du premier générateur est relié au pôle positif du second, puis le pôle négatif du second au pôle positif du troisième, et ainsi de suite, le couplage est *série* (fig. 4). Les bornes extrêmes, libres, sont celles du groupement.

Soient $n$ éléments, chacun de force électromotrice $e$ et de résistance interne $r$. Nous constatons par la mesure que :
Dans un montage série, les différences de potentiel s'ajoutant, il en est de même des forces électromotrices ; celle du groupement est donc :

$$E = e + e + \ldots = ne.$$

La résistance interne $R_i$ du groupement est la somme des résistances $r$ :

$$R_i = r + r + r + \ldots = nr.$$

Ce montage est utilisé lorsqu'on veut une force électromotrice supérieure à celle des générateurs dont on dispose.

REMARQUE.

Des générateurs en série débitent le même courant.

On peut associer en série des générateurs de f. é. m. et de natures différentes ; mais le courant débité par ce couplage est limité par le générateur qui tolère la plus faible intensité (1).

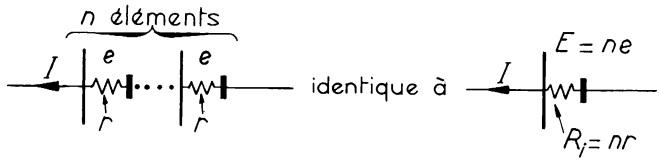



FIG. 4. — **Groupement en série.**

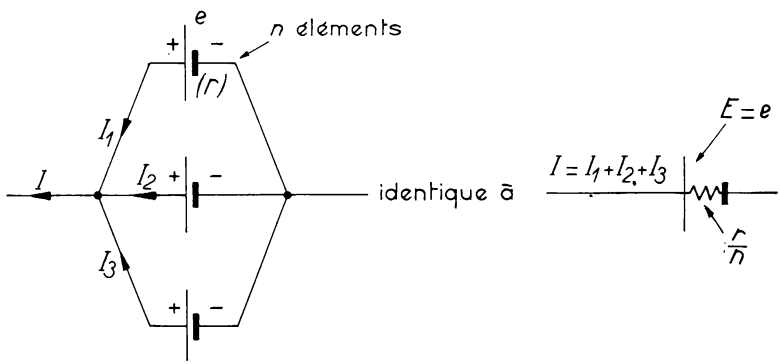



FIG. 5. — **Groupement en parallèle.**

## 2 — Générateurs en parallèle.

Lorsque les pôles de même nom sont réunis entre eux (fig. 5) par un conducteur, le couplage est *parallèle.*

Soient $n$ éléments, chacun de force électromotrice $e$ et de résistance $r$.

Nous vérifions avec un voltmètre que la force électromotrice $E$ du groupement est égale à celle d'un seul générateur : $E = e$.

Les résistances internes sont en parallèle et la résistance équivalente est : $R_i = \frac{r}{n}$.

Ce groupement est utilisé chaque fois que l'intensité de courant demandée dépasse celle que peut fournir chacun des générateurs pris séparément.

---

(1) Le principe de la conservation de l'énergie — donc de la puissance — permet de démontrer l'addition des forces électromotrices. En effet, $P_1 = E_1 I$, $P_2 = E_2 I \ldots$ et, par définition pour le groupement $P = EI$; or $P = P_1 + P_2 + \ldots$, donc

$$E = E_1 + E_2 + \ldots$$

Remarque.

Ce mode de couplage exige que les éléments en parallèle soient identiques, sinon des courants de circulation s'établissent à l'intérieur du groupement, entraînant des pertes de puissance et la mise hors d'usage des éléments, sans même qu'il y ait débit sur un circuit extérieur.

### 3 — Groupement mixte.

Soient $s$ générateurs identiques montés en série, chacun de force électromotrice $e$ et de résistance interne $r$. Disposons $p$ séries en parallèle : l'ensemble constitue un *groupement mixte* (fig. 6).

Le générateur unique équivalent est caractérisé par :

f. é. m. : $E = se$

résistance interne : $R_i = \frac{sr}{p}$.

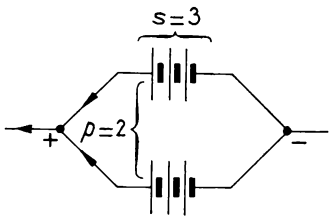



Fig. 6. — **Groupement mixte.** Dans le cas de la figure : 3 éléments en série ; 2 séries en parallèle. $E = 3e$; $R_i = 1{,}5\ r$.

### 4 — Groupement en opposition (fig. 7).

Deux générateurs sont en opposition lorsqu'un pôle de l'un est relié au pôle de *même nom* de l'autre. Ce groupement est caractérisé par les propriétés suivantes :

— les forces électromotrices *se retranchent;*

— le générateur qui a la plus grande force électromotrice impose le sens du courant (la f.é.m. de l'autre, qui tend à s'opposer au passage du courant est appelée, dans ce cas, force contre-électromotrice).

Exemples.

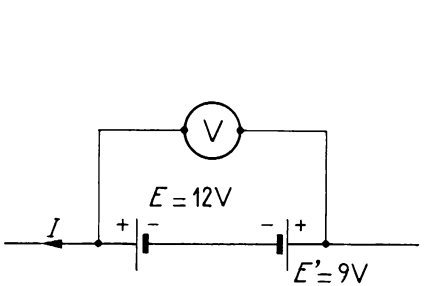
Dans la figure 7*a*, la f.é.m. résultante est $E - E' = 3$ V.

Le circuit fermé (fig. 7 *b*) comporte, montés en opposition, les générateurs $E_1$, $E_2$ ($E_1 > E_2$).

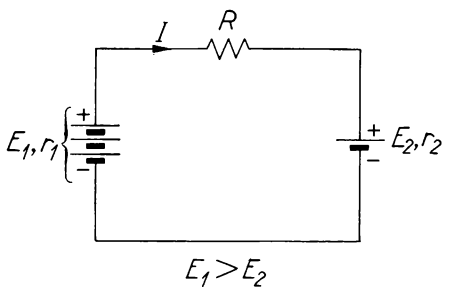
Soit $E_1 = 24$ V, $E_2 = 12$ V, $R = 5\ \Omega$, $r_1 = 4\ \Omega$, $r_2 = 1\ \Omega$.

Le courant $I$ qui circule est tel que :

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R + r_1 + r_2} = \frac{24 - 12}{10} = 1{,}2 \text{ A.}$$




(*a*)




(*b*)

Fig. 7. — **Groupements en opposition.**

# F. — Exercices résolus

**1.** *Un générateur de caractéristiques :* E = 4,5 V ; r = 1 Ω *débite un courant* I = 0,1 *ampère dans un circuit extérieur. Calculer :*

a) *La différence de potentiel* U *aux bornes du générateur.*

b) *La puissance électrique totale* $P_t$ *fournie.*

c) *La puissance perdue* p *et la puissance utile* $P_u$.

**Solution.**

*a*) La loi des générateurs nous donne : $E = U + rI$.

On en déduit la différence de potentiel aux bornes :

$$U = E - rI = 4{,}5 - 1 \times 0{,}1 = 4{,}4 \text{ V}.$$

*b*) La puissance électrique totale est :

$$P_t = EI = 4{,}5 \times 0{,}1 = 0{,}45 \text{ W}.$$

*c*) La puissance perdue par effet Joule dans la résistance interne est :

$$p = rI^2 = 1 \times 0{,}1^2 = 0{,}01 \text{ W}.$$

La puissance utile au circuit extérieur est :

$$P_u = UI = 4{,}4 \times 0{,}1 = 0{,}44 \text{ W}.$$

REMARQUE.

On observera que la conservation de la puissance est vérifiée puisque :

$$p + P_u = 0{,}01 + 0{;}44 = 0{,}45 \text{ W} = P_t.$$

**2.** *A partir de 12 éléments de pile, on réalise un groupement mixte comprenant* p = *3 dérivations de chacune* s = *4 éléments montés en série. Chaque élément a une f. é. m.* e = *1,5 volt et une résistance interne* r = 3 *ohms.*

a) *Quelles sont la résistance interne* $R_i$ *et la f. é. m.* E *du groupement ?*

b) *Comparez les courants de court-circuit* $i_{cc}$ *d'un élément et* $I_{cc}$ *du groupement.*

c) *Le groupement débite sur une charge* R = 4 Ω : *quelle est la puissance utile ?*

**Solution.**

*a*) Pour un groupement mixte de $p$ séries ayant chacune $s$ éléments, la résistance est

$$R_i = \frac{sr}{p} = \frac{4 \times 3}{3} = 4\ \Omega.$$

La f. é. m. du groupement vaut :

$$E = se = 4 \times 1{,}5 = 6 \text{ V}.$$

*b*) $i_{cc} = \dfrac{e}{r} = \dfrac{1{,}5}{3} = 0{,}5$ A ; $\quad I_{cc} = \dfrac{E}{R_i} = \dfrac{6}{4} = 1{,}5 \text{ A} > i_{cc}$.

*c*) $I = \dfrac{E}{R + R_i} = \dfrac{6}{4 + 4} = 0{,}75$ A ; $\quad P_u = RI^2 = 4 \times 0{,}75^2 = 2{,}25$ W.

**3.** *Une pile de f. é. m. constante* E = *4,5 volts a donné en charge les valeurs suivantes :*

| $U_{(V)}$ | 4 | 3,5 | 2,5 | 1 |
|---|---|---|---|---|
| $I_{(A)}$ | 0,5 | 1 | 2 | 3,5 |

1° *Tracer la caractéristique* U = f (I) *; en déduire la résistance interne de la pile.*

2° *Montrer que la puissance maximale utile est obtenue pour le point M, milieu de la caractéristique.*

3° *Que valent, lorsque la puissance utile est maximale, la charge* R *et le rendement ?*

**Solution.**

1° La caractéristique $U = f(I)$ est donnée par la figure 8 ; on la prolonge jusqu'à sa rencontre avec l'axe des $I$ pour trouver le courant de court-circuit.

On trouve · $I_{cc} = 4{,}5$ A.

$$\text{tg } \alpha = \frac{E}{I_{cc}} = r \text{ représente la resistance interne de la pile.}$$

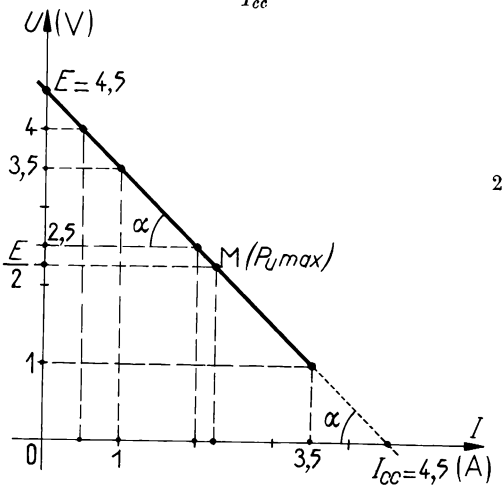



FIG. 8.

Elle a pour valeur :

$$\frac{E}{I_{cc}} = \frac{4{,}5}{4{,}5} = 1 \text{ ohm}$$

d'où tg $\alpha = 1$ ; $\alpha = 45°$, lorsque 1 V et 1 A sont représentés par la même longueur.

2° La puissance utile est la puissance dans la résistance de charge :

$$P_u = UI$$

et comme $U = E - rI$ :

$$P_u = (E - rI)\, I$$

ou

$$P_u = r\left(\frac{E}{r} - I\right) I.$$

Les deux termes variables de ce produit ont une somme constante ; leur produit est donc maximal lorsqu'ils sont égaux :

$$I = \frac{E}{r} - I \; ; \; I = \frac{E}{2r} \; ; \; \boxed{I = \frac{I_{cc}}{2}}.$$

Le point de fonctionnement correspondant est donc le milieu M de la caractéristique en charge.

Notons que :

$$U = E - r\frac{I_{cc}}{2} = E - r\frac{E}{2r} = \frac{E}{2},$$

et

$$P_{u\,\max} = \frac{E}{2} \cdot \frac{I_{cc}}{2} = \frac{E^2}{4r}.$$

3° La charge $R$ vaut alors :

$$R = \frac{U}{I} = \frac{E}{2} : \left(\frac{I_{cc}}{2}\right) = \frac{E}{I_{cc}} = r,$$

et le rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{EI} = \frac{UI}{EI} = \frac{U}{E} = \frac{1}{2}.$$

APPLICATION NUMÉRIQUE :

$$P_{u\,\max} = \frac{E^2}{4r} = 5{,}06 \approx 5{,}1\text{W. Ou : } P_{u\,\max} = r\left(\frac{I_{cc}}{2}\right)^2 = r\frac{E^2}{4r^2} = \frac{E^2}{4r} = 5{,}1 \text{ W.}$$

En résumé, *la puissance utile est maximale lorsque la charge* R *est égale à la résistance interne* r : $R = r$ et $U = \frac{E}{2}$, $I = \frac{I_{cc}}{2}$, $P_{u\,\max} = \frac{E^2}{4r}$, $\eta = \frac{1}{2}$.

## PROBLÈMES DE LA LEÇON XI

**1.** Un voltmètre aux bornes d'une pile indique une tension à vide $E = 9$ volts, une tension $U = 7{,}4$ volts lorsqu'elle débite un courant de 8 ampères.

Calculer la résistance interne $r$ de la pile.

**Réponse : $r = 0{,}2$ ohm.**

**2.** Un générateur tournant a pour force électromotrice $E = 120$ volts et pour résistance interne $r = 50$ milliohms ; en charge, la tension mesurée est $U = 115$ volts.

Calculer l'intensité débitée.

**Réponse : $I = 100$ A.**

**3.** Un courant $I = 200$ milliampères est débité dans un circuit d'utilisation par une pile dont les caractéristiques sont $E = 4{,}5$ volts et $r = 1{,}5$ ohms. Calculer :

— La tension $U$ aux bornes de la pile.
— La puissance électrique totale fournie $P$.
— La puissance perdue $p$ en chaleur dans la pile.
— La puissance utile $P_u$.

**Réponses : $U = 4{,}2$ V ; $P = 0{,}90$ W ; $p = 60$ mW ; $P_u = 840$ mW.**

**4.** Une pile de force électromotrice $E = 4{,}5$ volts, de résistance interne $r = 1$ ohm, débite dans une résistance $R = 2$ ohms. Calculer :

*a*) La quantité de chaleur dégagée dans $R$ en 20 minutes ; on donne $\frac{1}{4{,}18} = 0{,}24$.

*b*) Le rendement $\eta$ de la pile.

**Réponses : a) $q = 1\,296$ calories ; b) $\eta \approx 0{,}67$.**

**5.** Un élément d'accumulateur a pour force électromotrice $E = 2{,}4$ volts et pour résistance interne $r = 0{,}012$ ohm.

1° On dispose 12 éléments identiques pour former un groupement en série de générateurs. Calculer :
— La résistance interne $r_t$ de groupement.
— La force électromotrice globale $E_1$.

2° On dispose les mêmes éléments en parallèle.
Calculer :
— La résistance interne $r'_t$ du nouveau groupement.
— La force électromotrice $E_2$ résultante.

**Réponses : 1° $r_t = 0{,}144$ Ω ; $E_1 = 28{,}8$ V ; 2° $r'_t = 1$ mΩ ; $E_2 = 2{,}4$ V.**

**6.** Une génératrice à courant continu, dont le rendement industriel est $\eta_i = 0{,}8$ et la résistance interne $r = 0{,}2$ ohm, fournit à un circuit d'utilisation un courant $I = 26$ ampères sous une tension $U = 120$ volts.

Calculer :

*a*) La puissance $P_a$ absorbée par le générateur.

*b*) La puissance électrique totale $P_e$ fournie par le générateur.

*c*) Le rendement électrique $\eta_e$.

**Réponses : a) $P_a = 3{,}9$ kW ; b) $P_e \approx 3{,}26$ kW ; c) $\eta_e \approx 0{,}96$.**

**7.** 1° L'ensemble formé par $N$ générateurs identiques montés en parallèle possède une résistance intérieure de 0,03 ohm ; si on les dispose tous en série, la résistance intérieure de l'ensemble devient 1,92 ohm.
Calculer $N$, ainsi que la résistance intérieure de chaque élément.

2° On monte trois résistances en série ; deux d'entre elles valent chacune $X$ ohms, la troisième vaut $Y$ ohms ; la résistance totale ainsi obtenue est 19 ohms. Si les trois résistances sont montées en parallèle, la résistance équivalente vaut 2,1 ohms. Quelles sont les valeurs possibles pour $X$ et $Y$ ?

*(Concours admission E. S. M. Saint-Cyr, 1967 ; option Lettres : Sciences physiques.)*

**Réponses : 1° N = 8 ; r = 0,24 Ω.**
**2° X = 6,0 Ω et 6,65 Ω ; Y = 7 Ω et 5,7 Ω.**

**8.** On veut transformer un milliampèremètre de caractéristiques : 0,1 milliampère ; 0,1 volt ; échelle 100 divisions, en ohmmètre à l'aide d'une pile de 1,5 volt.

*a*) Calculer la résistance $R$ du rhéostat nécessaire à la réalisation du circuit de l'ohmmètre.

*b*) On introduit alors des résistances $x$ à mesurer ; et l'on a relevé le tableau des valeurs suivantes :

| $d$ (div.) | 94 | 84 | 75 | 59 | 50 | 40 | 30 | 20 | 9 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $x$ (Ω) | 1 000 | 3 000 | 5 000 | 10 000 | 15 000 | 23 000 | 35 000 | 60 000 | 150 000 | 225 000 |

Tracer la courbe $d = f(x)$. Contrôler le tableau de mesures par le calcul.

*c*) Dessiner le cadran de l'ohmmètre et les correspondances avec l'échelle du milliampèremètre donné.

**Réponse : a) $R$ = 14 000 Ω.**

**9.** On donne le montage ci-dessous :

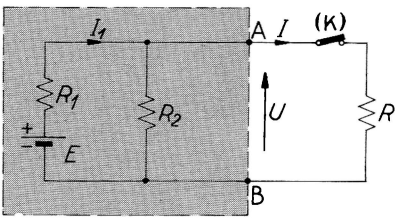



FIG. Pb 9.

1° Calculer le courant $I$.

2° Quelles sont la force électromotrice $E_0$ et la résistance interne $R_0$ de la pile qui débiterait dans $R$ le même courant $I$ ?

3° Faire le schéma équivalent. Montrer que $E_0$ est égale à la tension obtenue à vide, c'est-à-dire entre A et B lorsqu'on ouvre K ; et que $R_0$ est équivalent à $R_1$ et $R_2$ en parallèle.

4° *Application numérique :* $E = 6$ V ; $R = 2{,}25$ Ω ; $R_1 = 1$ Ω ; $R_2 = 3$ Ω.

**Réponses : 1°** $I = \dfrac{R_2 E}{R_1 (R + R_2) + R R_2}$.

**2°** $E_0 = E \dfrac{R_2}{R_2 + R_1}$ ; $R_0 = \dfrac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$.

**3° Le schéma équivalent est formé par $E_0$ et $R_0$ en série, montés aux bornes A et B.**

**4° $E_0$ = 4,5 V ; $R_0$ = 0,75 Ω ; $I$ = 1,5 A.**

**10.** Un circuit utilisé dans un montage à transistor comporte (figure ci-dessous), entre A et B :

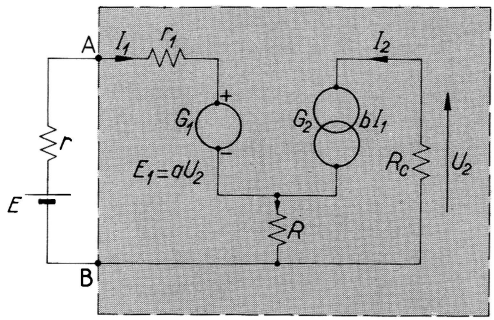



FIG. Pb 10.

*a*) Un générateur de tension $G_1$ asservi à la tension $U_2$ et tel que $E_1 = a\,U_2$.

*b*) Un générateur de courant $G_2$ réglé de façon que $I_2 = bI_1$ ($a$ et $b$ étant des constantes données).

*c*) Des résistances $r_1$, $R$, et $R_c$ aux bornes de laquelle existe une tension $U_2$, toutes trois montées suivant le schéma.

Une pile de force électromotrice $E$ constante et de résistance interne $r$ est appliquée aux bornes A et B du circuit.

1° Calculer la résistance équivalente $R_1$ à l'ensemble du circuit entre A et B.

2° Donner le schéma équivalent à l'ensemble du circuit et de la pile.

**Réponses : 1° $R_e = r + r_1 + R\,(1 + b) - ab\,R_c$.**

**2° Le schéma équivalent est un circuit fermé comportant $E$, $r$ et $R_e$ en série.**

**11.** Étant donné le montage suivant comportant en parallèle aux bornes de AB :

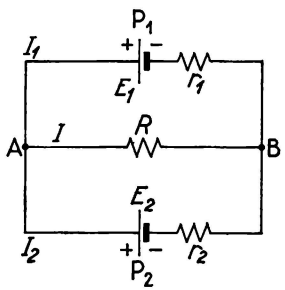



FIG. Pb 11.

— Une pile $P_1$ ($E_1 = 4{,}5$ V ; $r_1 = 0{,}5\ \Omega$).
— Une pile $P_2$ ($E_2 = 1{,}5$ V ; $r_2 = 0{,}1\ \Omega$).
— Une résistance morte $R = 10\ \Omega$.

1° Calculer les intensités $I$, $I_1$, $I_2$.

2° Déterminer le sens des mêmes intensités dans chaque branche du circuit.

**Réponses : 1° $I_1 = 5{,}03$ A ; $I_2 = 4{,}83$ A ; $I = 0{,}20$ A.**

**2° $I_1$ de B vers A à travers $P_1$ ; $I_2$ de A vers B à travers $P_2$ ; $I$ de A vers B à travers $R$.**

**12.** Un circuit comporte entre A et B : trois générateurs en parallèle de forces électromotrices $E_1$, $E_2$, $E_3$ et de résistances internes $R_1$, $R_2$, $R_3$ ; il est relié à un circuit extérieur de résistance $R$.

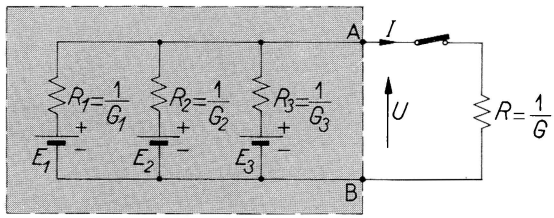



FIG. Pb 12.

1° Montrer que pour le calcul du courant $I$ débité dans une résistance extérieure $R$, un générateur de tension $E_1$, $R_1$ en série, peut être remplacé par un générateur de courant $I_{1cc} = \frac{E_1}{R_1}$, et une résistance $R_1$ en parallèle.

2° Quelles sont la force électromotrice $E_0$ et la résistance interne $R_0$ du générateur unique équivalent aux trois générateurs donnés.

3° Calculer l'intensité $I$ à travers $R$ et la tension $U$ aux bornes de A et B ; faire l'application numérique pour : $E_1 = 10$ V ; $R_1 = 2$ Ω.
$E_2 = 6$ V ; $R_2 = 3$ Ω.
$E_3 = 12$ V ; $R_3 = 4$ Ω et $R = 2$ Ω.

**Réponses : 1° On trouve $I_1 = \frac{E_1}{R + R_1}$ pour les deux générateurs équivalents.**

**2° En exprimant les résistances en fonction de leur conductance, le schéma équivalent est constitué par un générateur de courant $I_{cc}$ en parallèle avec une conductance $G_0$.**

**3° $E_0 = 9{,}2$ V ; $R_0 = 0{,}92$ Ω ; $I = 3{,}16$ A ; $U = 6{,}3$ V.**

**13.** On veut mesurer la résistance $R_v$ d'un voltmètre à l'aide d'une résistance.

*a*) Ce voltmètre branché aux bornes d'une pile de force électromotrice $E$ et de résistance $r$ ($r \ll R_v$) indique $N_1$ divisions.

*b*) Ce même voltmètre n'indique plus que $N_2$ divisions lorsque l'on introduit en série dans le circuit une résistance réglable.

1° Si l'on ajuste la résistance réglable à une valeur $R$ telle que $N_2 = \frac{N_1}{2}$, quelle conclusion peut-on tirer ?

2° On ne dispose plus d'une résistance réglable mais d'une résistance $R'$ quelconque. En répétant les opérations *a*) et *b*), exprimer, en fonction de $R'$, la valeur de la résistance $R_v$ du voltmètre.

**Réponses : 1° $R_v = R$ ; 2° $R_v = R' \frac{N_2}{N_1 - N_2}$.**

# XII. — RÉCEPTEURS A FORCE CONTRE-ÉLECTROMOTRICE

**MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL :**

— moteur : 0,25 ch ; 120 volts;
— batterie 6 volts ;
— électrolyseur à électrodes de charbon, eau acidulée;
— rhéostat ;
— voltmètres 0-120 V et 0-5 V ;
— ampèremètres 10 A et 1 A ;
— résistances.

## A. — Définitions

### 1. FORCE CONTRE-ÉLECTROMOTRICE

Rappelons (*voir* p. 118) que lorsqu'un appareil intercalé dans un circuit est le siège d'une f.é.m., celle-ci est appelée *force contre-électromotrice* (f.c.é.m.), si elle tend à s'opposer au passage du courant à travers l'appareil.
Les mesures montrent qu'un moteur électrique (§ B, C), une cuve à électrolyse possèdent une f.c.é.m., qui est le moyen de la transformation d'énergie électrique en énergie mécanique ou chimique.

### 2. DIPÔLE PASSIF; DIPÔLE ACTIF.

On appelle *dipôle*, tout dispositif électrique qui peut échanger, par 2 bornes, de l'énergie électrique avec l'extérieur.
Un dipôle est dit *passif* lorsqu'il reçoit de l'énergie électrique et fournit de l'énergie calorifique. *Exemples :* résistance ou ensemble de résistances alimentées entre deux points. Un dipôle passif ne comporte pas de f.é.m. (ni de f.c.é.m.).
Les dipôles *actifs* sont :

— des générateurs, s'ils fournissent de l'énergie électrique et consomment de l'énergie chimique (piles, accumulateurs), mécanique (générateurs tournants), calorifique (thermocouple...) ;
— des récepteurs (*exemple :* fig. 1) s'ils consomment de l'énergie électrique et fournissent de l'énergie mécanique ou chimique (et calorifique). Le présent chapitre étudie les dipôles actifs récepteurs.

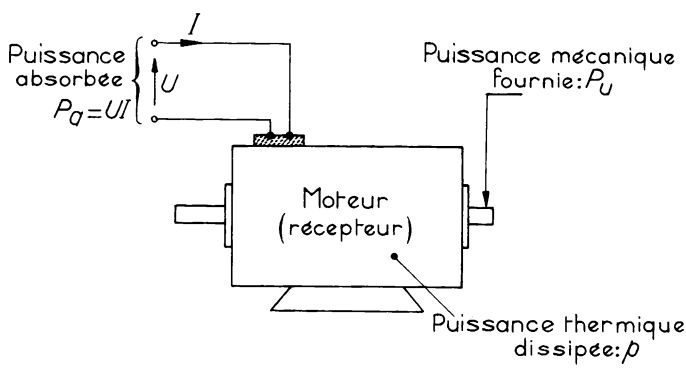



FIG. 1.

# B. — Grandeurs caractéristiques

## 1. — UN RÉCEPTEUR EST CARACTÉRISÉ PAR SA FORCE CONTRE-ÉLECTROMOTRICE

### Expérience 1.

*a*) Un moteur M (fig. 2 *a*) est soumis à sa tension d'alimentation $U$ lorsque l'interrupteur (K) est fermé. Soit $I$ le courant de régime.

*b*) Ouvrons maintenant (K) : le moteur continue à tourner pendant quelques secondes en ralentissant (fig. 2 *b*) ; l'ampèremètre indique $I = 0$ ; seul le voltmètre dévie toujours *dans le même sens* — un courant $i$ parcourt le circuit moteur-voltmètre — mais la déviation diminue au fur et à mesure du ralentissement et s'annule à l'arrêt.

Ceci montre qu'il existe, pendant la rotation du moteur, une force électromotrice qui s'oppose à la tension d'alimentation du moteur : on l'appelle **force contre-électromotrice**, parce qu'elle tend à s'opposer au passage du courant ; nous la noterons $E'$.

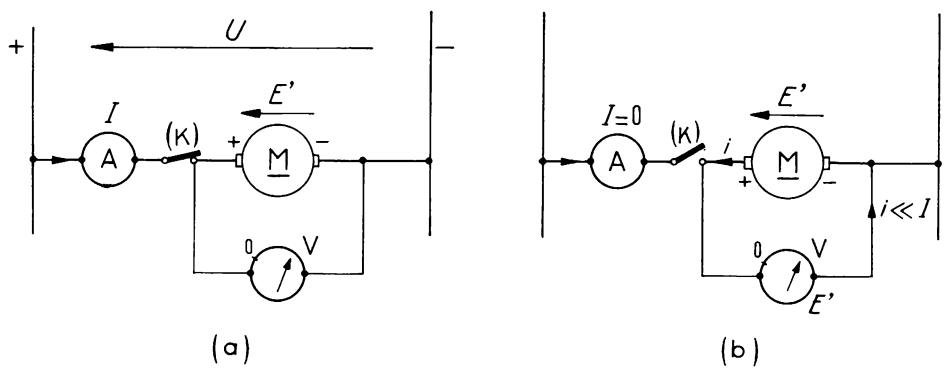



FIG. 2. — *a*) Le moteur est alimenté : le voltmètre dévie dans un sens ; il indique la tension d'alimentation à ses bornes. *b*) On ouvre le circuit d'alimentation : le voltmètre continue de dévier sous l'action de $E'$.

### Expérience 2.

Un électrolyseur à électrodes de charbon est rempli d'eau acidulée sulfurique (fig. 3 *a*).

*a*) Fermons (K) : un dégagement gazeux se produit sur les deux électrodes, tandis que le voltmètre dévie pour se stabiliser autour de 2 volts ; un courant $I$ parcourt le circuit batterie-électrolyseur.

*b*) Ouvrons (K) (fig. 3 *b*) : la batterie est mise hors circuit ; le voltmètre continue de dévier, mais sa déviation diminue rapidement et régulièrement.

L'électrolyseur se comporte donc momentanément comme un générateur, et sa force électromotrice produit un faible courant $i$ en sens inverse à travers l'électrolyseur : cette force électromotrice est, pendant le *fonctionnement normal*, de sens opposé à la force électromotrice de la batterie d'alimentation ; on l'appelle **force contre-électromotrice**, nous la noterons encore $E'$.

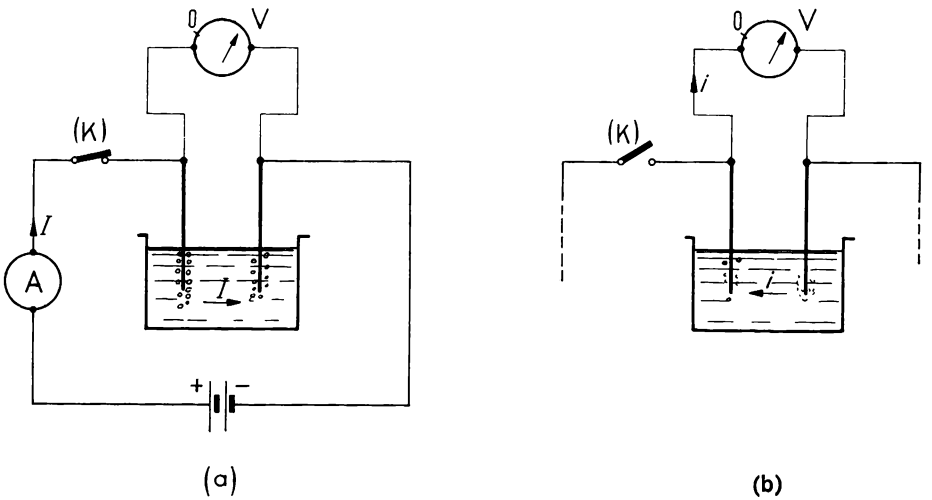



FIG. 3.

## 2. — UN RÉCEPTEUR POSSÈDE UNE RÉSISTANCE INTERNE

Tout récepteur, transformant inévitablement une fraction de l'énergie électrique en chaleur, se comporte, du point de vue des pertes thermiques, comme une résistance $r$ à laquelle la loi de Joule est applicable ($p = r I^2$).

Cette résistance $r$ est appelée la **résistance interne** du récepteur.

Dans les moteurs, la résistance interne est faible, de quelques dixièmes d'ohm à quelques ohms suivant le type.

Dans les cuves à électrolyse, la résistance interne dépend de plusieurs facteurs : de la concentration et de la nature de l'électrolyte, de la nature et de la distance des électrodes ; elle reste cependant faible et varie de quelques millièmes d'ohm à quelques dizaines d'ohms.

# C. — Lois d'Ohm

Nous négligerons les pertes autres que par effet Joule (*voir* § D).

## I. — EXPRESSION DE LA LOI D'OHM POUR UN RÉCEPTEUR à f. c. é. m.

Pour fixer les idées, considérons un moteur électrique (fig. 4) ; le cas de la cuve à électrolyse ou de l'accumulateur s'en déduit en remplaçant énergie mécanique par énergie chimique.

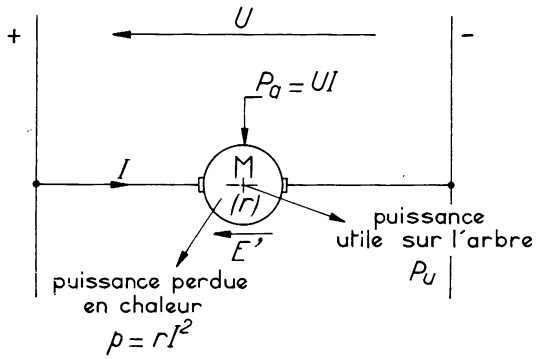



FIG. 4. — Un moteur est un récepteur à force contre-électromotrice $E' = U - rI$.

Le bilan des puissances est le suivant :

*a*) La puissance électrique absorbée $P_a$ par le moteur, sous tension $U$ appliquée à ses bornes, est :

$$P_a = UI.$$

*b*) La puissance $p$ dissipée par effet Joule dans le récepteur de résistance interne $r$ est :

$$p = rI^2.$$

*c*) La puissance utile $P_u$ fournie sous forme mécanique par le moteur sur son arbre.

Le Principe de la conservation de l'énergie nous permet d'écrire :

$$P_a = P_u + p$$

soit

$$UI = P_u + rI^2. \qquad (1)$$

En divisant les deux membres par $I$, il vient :

$$U = \frac{P_u}{I} + rI. \qquad (2)$$

Le quotient $\frac{P_u}{I} = \frac{P_u t}{I t} = \frac{W}{Q}$ mesure l'énergie transformée en travail mécanique par le moteur pour chaque coulomb qui le traverse; nous le désignons par $E'$, soit $\frac{P_u}{I} = E'$ ; c'est, par définition, la force contre-électromotrice du moteur.

La relation (2) peut donc s'écrire sous sa nouvelle forme dite **loi d'Ohm** pour un récepteur à f. c. é. m. :

$$\boxed{U = E' + rI}$$

$E'$ f. c. é. m. en volt.
$U$ tension en volt.
$r$ résistance interne en ohm.
$I$ intensité d'alimentation en ampère.

## 2. — LOI D'OHM POUR UN CIRCUIT COMPORTANT UN GÉNÉRATEUR ET UN RÉCEPTEUR (fig. 5)

La différence de potentiel étant la même à leurs bornes communes A et B, nous avons :

— aux bornes du générateur :

$$U = E - rI,$$

— aux bornes du récepteur :

$$U = E' + r'I.$$

On en déduit :

$$E - rI = E' + r'I$$

soit encore

$$E - E' = (r + r')\, I$$

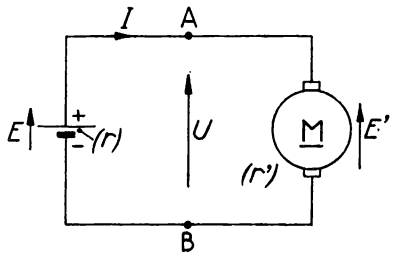



FIG. 5. — C'est la différence $E - E'$ qui produit le courant $I$ dans $r + r'$.

d'où

$$\boxed{I = \frac{E - E'}{r + r'}}$$

$E$ et $E'$ en volt.
$r$ et $r'$ en ohm.
$I$ en ampère.

REMARQUE 1.

Lorsque deux générateurs sont montés en opposition, celui qui a la plus grande force électromotrice impose le sens du courant, l'autre fonctionnant alors en récepteur. $I$ se calcule par la relation précédente, complétée le cas échéant par la résistance $R$ du reste du circuit (p. 118).

REMARQUE 2.

$E'$ se retranche de $E$ et diminue $I$ ; le terme f. c. é. m. est justifié une nouvelle fois. Pour $E' = E$, on a $I = 0$, ce qui est pratiquement le cas pour un moteur tournant à vide.

## 3. — GÉNÉRALISATION

Le circuit comporte en série : un ou plusieurs générateurs, un ou plusieurs récepteurs, une ou plusieurs résistances mortes dont celle des fils de ligne qui n'est pas toujours négligeable.

Pour calculer le courant, on effectue séparément :
— la somme des forces électromotrices,
— la somme des forces contre-électromotrices (voir § E1),
— la somme des résistances.

Le courant est :

$$I = \frac{\text{Somme des f. é. m. — Somme des f. c. é. m.}}{\text{Somme des résistances}}$$

ce qui s'écrit, en utilisant la lettre grecque $\Sigma$ (qui se prononce *sigma* et signifie « somme de ») :

$$\boxed{I = \frac{\Sigma E - \Sigma E'}{\Sigma R}.}$$

# D. — Rendement d'un récepteur

D'une façon générale, le rendement énergétique d'un système est le rapport de la puissance utile (qu'il fournit) à la puissance absorbée : $\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - p}{P_a}$.

La différence $p = P_a - P_u$ constitue les pertes.

## 1. — Rendement électrique $\eta_e$ d'un récepteur.

On l'obtient en négligeant les pertes autres que par effet Joule, et alors $p = rI^2$ :

$$\eta_e = \frac{UI - rI^2}{UI} = \frac{U - rI}{U}; \qquad \boxed{\eta_e = \frac{E'}{U}}$$

## 2. — Rendement total $\eta$.

Il tient compte de toutes les pertes, donc $\eta < \eta_e$. Sa détermination exige de connaître le fonctionnement dans chaque cas particulier.

Pour un moteur, par exemple, $E'I$ est la puissance mécanique totale $P_t$ transmise à l'arbre ; une partie de cette puissance est perdue (frottement de l'arbre sur les paliers, etc. - *voir* fasc. II) et

$$P_u = P_t - p_c$$

$p_c$ = pertes mécaniques constantes.

$$\eta_e = \frac{P_t}{P_a} = \frac{E'I}{UI} = \frac{E'}{U}; \qquad \eta = \frac{P_t - p_c}{P_a} < \eta_e.$$

# E. — Groupement des récepteurs

## 1. — Récepteurs en série.

Les récepteurs $(E'_1, r_1)$, $(E'_2, r_2)\ldots$ sont traversés par le même courant $I$. On peut les remplacer par un récepteur équivalent :

— de résistance interne $r = r_1 + r_2 + \ldots$ puisque des résistances en série s'ajoutent ;

— de f. c. é. m. $E' = E'_1 + E'_2 + \ldots$ puisque la puissance utile totale $E'I$ est égale à la somme des puissances utiles :

$$E'I = E'_1 I + E'_2 I + \ldots = (E'_1 + E'_2 + \ldots)I.$$

Ce montage est utilisé pour des récepteurs présentant de faibles forces contre-électromotrices et parcourus par des courants importants : cuves à électrolyse de l'industrie électrométallurgique, charge d'accumulateurs.

### 2. — Récepteurs en parallèle.

Considérons deux fils conducteurs d'une ligne de distribution ; si nous connectons entre ces deux fils divers récepteurs (fig. 6), ils sont montés en parallèle. Il s'ensuit que tous les récepteurs sont soumis à la même tension.

Ce montage est couramment utilisé.

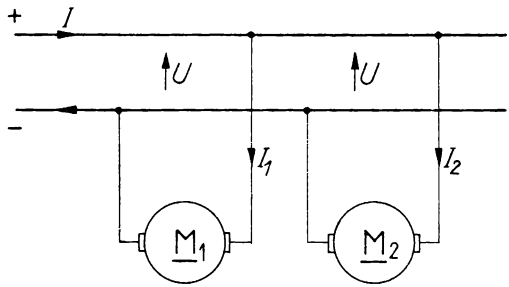



FIG. 6. — Les deux moteurs $M_1$ et $M_2$ sont montés sous la même tension $U$ de distribution.

# F. — Exercices résolus

**1.** *Entre les bornes d'un voltamètre, on maintient une tension constante de 5 volts. L'intensité du courant est 2 ampères et la résistance interne 1,6 ohm. Quelle est la valeur de la force contre-électromotrice du voltamètre?*

**Solution.**

La loi d'Ohm aux bornes d'un récepteur à f. c. é. m. est :

$$E' = U - rI.$$

Nous savons que :

$$U = 5 \text{ volts}$$
$$I = 2 \text{ ampères}$$
$$r = 1{,}6 \text{ ohm.}$$

Il en découle :

$$E' = 5 - 1{,}6 \times 2 = 1{,}8 \text{ volt.}$$

**2.** *Un circuit fermé comporte un générateur tournant, de force électromotrice 146 V et de résistance interne 0,25 Ω, alimentant un électrolyseur de force contre-électromotrice 3,5 V et de résistance interne 3 Ω, en série avec 20 lampes montées en parallèle présentant chacune une résistance de 180 Ω. Sachant que la résistance des conducteurs est 0,75 Ω, on demande :*

— *l'intensité du courant total d'alimentation ;*

— *la tension aux bornes de l'électrolyseur ;*

— *la tension aux bornes des lampes.*

**Solution.**

1° Résistance équivalente au groupement des lampes en parallèle :

$$\frac{1}{R} = \Sigma \frac{1}{R_1} = \frac{20}{180} \text{ ; d'où } R = \frac{180}{20} = 9\ \Omega.$$

$$\left(\text{Ou : } R = \frac{R_1}{n} = \frac{180}{20} = 9\ \Omega\right)$$

Résistance totale du circuit :

$$\Sigma R = 9 + 3 + 0{,}75 + 0{,}25 = 13\ \Omega.$$

Intensité du courant total :

$$I = \frac{E - E'}{\Sigma R} = \frac{146 - 3{,}5}{13} = 11 \text{ A.}$$

2° Tension aux bornes de l'électrolyseur.

De la relation : $E' = U - rI$, nous tirons :

$$U = E' + rI = 3{,}5 + 3 \times 11 = 36{,}5 \text{ V.}$$

3° Tension aux bornes des lampes :

$$U' = RI = 9 \times 11 = 99 \text{ V.}$$

## PROBLÈMES DE LA LEÇON XII

**1.** Calculer le courant $I$ qui traverse un récepteur de force contre-électromotrice $E' = 2{,}5$ volts et de résistance interne $r = 5$ ohms lorsqu'on lui applique une différence de potentiel $U = 115$ volts. Si le courant à admettre est de 10 ampères, quelle doit être la différence de potentiel $U'$ pour l'obtenir ?

**Réponses : $I = 22{,}5$ A ; $U' = 52{,}5$ V.**

**2.** Une ligne de distribution basse tension alimente, sous une différence de potentiel $U = 220$ volts, les récepteurs suivants disposés en parallèle et dont les puissances indiquées ci-dessous correspondent à cette tension :

12 lampes à incandescence de 60 watts chacune ;
1 moteur électrique absorbant 500 watts ;
1 radiateur de 1 kilowatt.

Calculer :

*a*) L'intensité $I$ absorbée par l'installation.

*b*) La résistance $R$ du radiateur dans les conditions de fonctionnement.

*c*) La force contre-électromotrice $E'$ du moteur dont la résistance interne est $r = 0{,}8$ ohm.

**Réponses : a) $I = 10{,}1$ A ; b) $R = 48{,}4\ \Omega$ ; c) $E' = 218{,}2 \approx 218$ V.**

**3.** Une génératrice de résistance 2 ohms entretient à ses bornes une tension de 120 volts ; elle débite sur une ligne (deux fils) de cuivre, de longueur 120 mètres, de 2 millimètres de diamètre, alimentant un moteur M de force contre-électromotrice 30 volts, de résistance 2,8 ohms ; la résistivité du cuivre est 1,6 microhm-centimètre carré par centimètre. Déterminer :

1° *a*) Le courant $I$ dans la ligne.

*b*) La tension $U_M$ aux bornes du moteur.

*c*) La chute $u$ de tension en ligne.

*d*) La force électromotrice $E$ de la génératrice.

*e*) Le rendement électrique $\eta$ de la génératrice et celui du moteur.

2° Faire le bilan des puissances de cette installation.

*(C. A. P. électrotechnique ; Bordeaux, 1960.)*

**Réponses : 1° a) $I = 10$ A ; b) $U_M = 108$ V ; c) $u = 12$ V ; $E = 140$ V ; $\eta_G = 0{,}86$ ; $\eta_M = 0{,}74$.**
**2° Puissance électrique de la génératrice : $P = 1\,400$ W comportant les pertes thermiques $p_1 = 120$ W dans la ligne, $p_2 = 200$ W dans la génératrice, $p_3 = 280$ W dans le moteur, et la puissance électrique transformée en puissance mécanique dans le moteur $P' = 800$ W.**

**4.** 1° Un voltmètre de grande résistance relié aux bornes d'une batterie d'accumulateurs indique, en circuit ouvert, 80 volts.
Quand on réunit les bornes de la batterie à un deuxième circuit comprenant une résistance $R$ et un ampèremètre (de résistance négligeable ainsi que celle des fils de connexion), le voltmètre n'indique plus que 78 volts. L'ampèremètre marque 2 ampères. En déduire la valeur de $R$ et celle de la résistance interne $r$ de la batterie.

2° On remplace $R$ par un moteur électrique qu'on laisse tourner. L'ampèremètre marque encore 2 ampères. En déduire la force contre-électromotrice $E'$ du moteur, sachant que sa résistance interne est 1 ohm.
Quelle est l'indication du voltmètre ?
Quelle est la puissance électrique totale du générateur ?
Quelle est la puissance consommée par le moteur ?
Que devient cette puissance consommée ?

3° Quelle serait l'indication de l'ampèremètre si l'on empêchait le moteur de tourner ? Ceci se produit aussi, juste au moment de la fermeture du circuit (démarrage du moteur). Que faut-il faire pour l'éviter et limiter, au moment du démarrage, l'indication de l'ampèremètre à 8 ampères ?

*(Bacc. C. et M.)*

**Réponses : 1° $R = 39\ \Omega$ ; $r = 1\ \Omega$ ; 2° $E' = 76$ V ; $U = 78$ V ; $P_G = 160$ W ; $P_M = 156$ W ($P_u$ utile 152 W et pertes Joules $p = 4$ W) ; 3° 40 A (rhéostat 8 $\Omega$).**

**5.** Un circuit fermé comporte en série un générateur $(E, r)$, un voltamètre $(E', r')$, un ampèremètre A dont on néglige la résistance interne, ainsi qu'un rhéostat $R$ pour régler l'intensité $I$ débitée. Un voltmètre est monté en dérivation aux bornes du voltamètre.
Pour $R = 11$ ohms, on relève : $I_1 = 1{,}6$ ampère ; tension aux bornes du voltamètre : $U_1 = 27$ volts.
Pour $R = 21$ ohms, on relève : $I_2 = 1{,}1$ ampère ; tension aux bornes du voltamètre : $U_2 = 22{,}5$ volts.

*a*) Tracer le schéma du circuit.

*b*) Calculer $E'$ et $r'$.

*c*) Calculer $E$ et $r$.

**Réponses : b) $E' = 12{,}6$ V ; $r' = 9\ \Omega$ ; c) $E \approx 47{,}8$ V ; $r \approx 2\ \Omega$.**

**6.** Une prise de courant AB fournit une différence de potentiel constante $V = 120$ volts. Entre ces deux points, on monte en série une résistance AC de 18 ohms, puis un moteur CB de résistance 2 ohms. La puissance mécanique fournie par le moteur, qui tourne sans frottements, est $P$ watts.

1° Exprimer $P$ en fonction de l'intensité $I$ du courant.

2° Pour quelle valeur de $I$ la puissance est-elle maximale ? Que vaut alors $P$ ?

3° En réalité $P = 175$ watts. Quelle est l'intensité du courant ?

4° Quelle est, dans ce cas, la force contre-électromotrice du moteur ?

5° Quelle est la différence de potentiel entre ses bornes ?

6° Répondre aux deux précédentes questions (4° et 5°) dans le cas de puissance maximale.

*(Admission E. S. M. Saint-Cyr ; option Lettre : épreuves de Sc. physiques, 1967.)*

**Réponses : 1°** $P = VI - (R + r)\, I^2$ ; **2°** $I = 3$ **A** ; $P = 180$ **W** ; **3°** $I_1 = 3{,}5$ **A** ; $I_2 = 2{,}5$ **A** ; **4°** $E'_1 = 50$ **V** ; $E'_2 = 70$ **V** ; **5°** $U_1 = 57$ **V** ; $U_2 = 75$ **V** ; **6° 60 V ; 66 V.**

# XIII. — ÉLECTROLYSE

**MATÉRIEL UTILISÉ :**

— source de 0 à 12 V et 0 à 24 V ;
— voltamètres de différentes formes ;
— électrodes diverses : fer, argent, charbon, cuivre ;
— eau ;
— chlorure cuivrique ;
— nitrate d'argent ;
— acide sulfurique ;
— rhéostat ;
— éprouvettes.

## A. — Étude qualitative

### 1. — Le passage du courant électrique dans certains liquides conducteurs produit des réactions chimiques.

*a*) *L'eau pure n'est pas conductrice.*

Plongeons les extrémités dénudées de deux fils conducteurs réunis à une batterie d'accumulateurs, dans une cuve contenant de l'*eau pure* (fig. 1) ; nous n'observons aucune déviation de l'ampèremètre : le courant ne passe pas, l'eau pure n'est donc pas conductrice.

Il en serait de même avec du pétrole, de la benzine, des huiles, des isolants liquides utilisés notamment dans les cuves de transformateurs.

*b*) *Les sels, les acides, les bases en solution dans l'eau ou à l'état fondu conduisent le courant.*

Versons dans l'eau de la cuve la solution d'un *sel*, par exemple du chlorure cuivrique $CuCl_2$. L'ampèremètre dévie : le courant passe (fig. 2) ; simultanément, on obtient du cuivre sur un conducteur, du chlore sur l'autre (le dégagement gazeux n'est visible que si l'anode est en platine ou en graphite, inattaquables par le chlore).

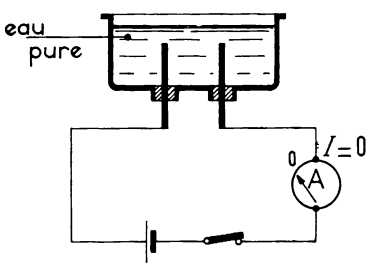



FIG. 1. — L'eau pure ne conduit pas le courant.

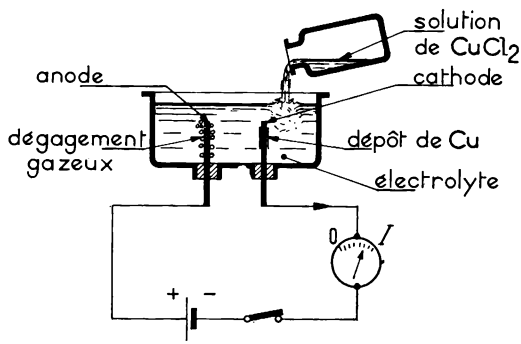



FIG. 2. — Électrolyse d'une solution de chlorure cuivrique.

Cette décomposition par le courant électrique se nomme **électrolyse.**

Au lieu d'un sel, ajoutons à l'eau de la cuve, soit une solution d'*acide* (de l'acide sulfurique : $H_2SO_4$ ou de l'acide chlorhydrique HCl...), soit une solution d'une *base* (soude : NaOH par exemple) : le courant passe, des réactions chimiques se produisent. Ces décompositions par le courant électrique se nomment **électrolyses** et les solutions qui conduisent le courant, *en se décomposant*, s'appellent **électrolytes.**

Les conducteurs qui plongent dans l'électrolyte sont les **électrodes** : celle par laquelle entre le courant est l'électrode (+) ou **anode**, celle par laquelle il sort, l'électrode (—) ou **cathode.**

L'*électrolyseur* est l'ensemble permettant de réaliser une électrolyse ; si l'appareillage permet la mesure de la quantité des corps produits par électrolyse, on l'appelle un *voltamètre.*

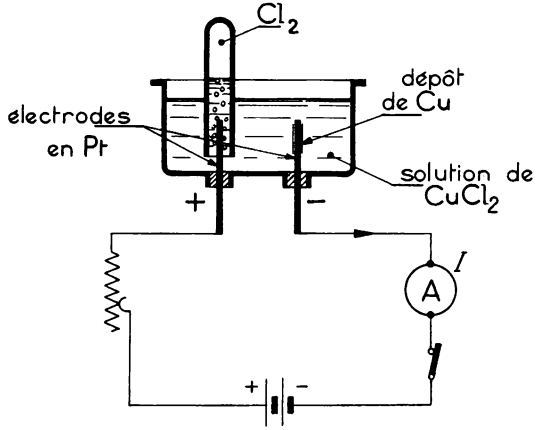



FIG. 3. — Le cuivre se dépose à la cathode. Le chlore se dégage à l'anode, bien qu'il s'en dissolve un peu dans l'eau.

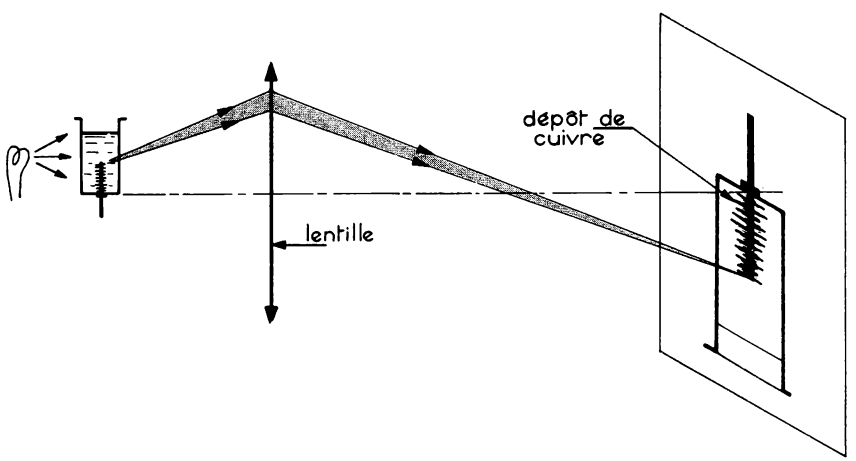



FIG. 4. — L'image de la cathode — agrandie et renversée par la lentille — montre l'apparition de fines houppes de cuivre déposées pendant le passage du courant. La figure montre la marche d'un pinceau lumineux.

*c*) *Les produits de la décomposition apparaissent* uniquement *sur les électrodes.* Considérons le montage de la figure 3 ; une solution de chlorure cuivrique $CuCl_2$ remplit la cuve ; deux tiges de platine (ou de charbon) servent d'électrodes.

Cette électrolyse permet d'observer :

— que le dégagement gazeux *sur l'anode* est un dégagement de chlore caractérisé par son odeur ;

— que des paillettes de cuivre apparaissent *sur la cathode;* en classe, on peut projeter l'image agrandie des électrodes sur un écran (fig. 4).

REMARQUE.

Le mercure, les métaux et les alliages métalliques fondus conduisent le courant sans se décomposer : ce ne sont pas des électrolytes.

## 2. — Le passage du courant dans un électrolyte est dû au déplacement des *ions*.

Nous avons vu (III, § B) que les atomes sont électriquement neutres, mais qu'ils peuvent recevoir ou perdre un ou plusieurs électrons : on dit qu'ils sont alors devenus des **ions**. Il en est de même pour certains groupements d'atomes ($NO_3^{-}$, $SO_4^{--}$ ...).

Par exemple, dans le cas du chlorure cuivrique $CuCl_2$ :

*a*) En solution, *et en l'absence de tout courant* (fig. 5 *a*), le chlorure cuivrique est dissocié en ions dans la proportion d'un ion cuivre pour deux ions chlore :

— l'ion cuivre provient d'un atome de cuivre par perte de deux électrons ; il se trouve alors chargé positivement ; on le représente par $Cu^{++}$ ;

— l'ion chlore ($Cl^-$) provient d'un atome de chlore par fixation d'un électron perdu par le cuivre.

*b*) Sous l'action d'une tension électrique appliquée à l'électrolyseur, il y a *attraction* des ions par les électrodes (fig. 5 *b*).

— L'ion cuivre, $Cu^{++}$, positif, est repoussé par l'anode (positive) et attiré par la cathode (négative) ; lorsqu'il touche la cathode, il en reçoit deux électrons et devient l'atome Cu électriquement neutre :

$$Cu^{++} + \underbrace{2e^-}_{\text{perdus par la cathode}} \rightarrow Cu$$

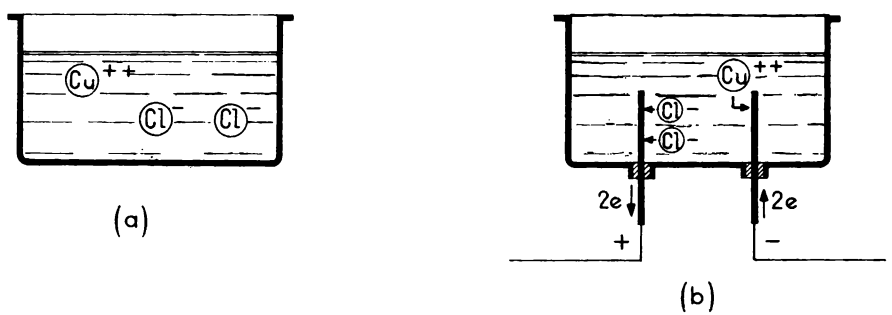



FIG. 5. — *a*) Chlorure cuivreux en solution : molécule dissociée en ions. *b*) Mouvement des ions sous l'action de la tension appliquée : le cation $Cu^{++}$ reçoit deux électrons de la cathode ; l'anion $Cl^-$ cède un électron à l'anode.

C'est parce qu'il vient se décharger sur la cathode que l'ion cuivre est appelé un ***cation***.

— De façon inverse, un ion chlore $Cl^-$, négatif, vient se décharger sur l'anode (c'est un ***anion***) et se transforme en atome de chlore ; si l'anode est inattaquable, 2 atomes s'unissent pour former une molécule :

$$2\ Cl^- \rightarrow Cl_2 + \underset{\text{cédés à l'anode}}{2\ e^-}.$$

Pour chaque molécule électrolysée, deux électrons ont traversé l'électrolyte.

Ces électrons ont été transportés d'un électrode à l'autre par les ions. L'électrolyse (décomposition) n'est donc pas un *effet* du courant, comme l'effet Joule ou l'effet magnétique mais le *moyen* par lequel le courant traverse l'électrolyte (fig. 6). Les résultats sont analogues dans toutes les électrolyses et permettent d'énoncer les *lois qualitatives de l'électrolyse :*

1. *Les produits de l'électrolyse n'apparaissent que sur la surface des électrodes.*
2. *L'hydrogène des acides, les métaux des bases et des sels apparaissent à la cathode, le reste de la molécule à l'anode.*

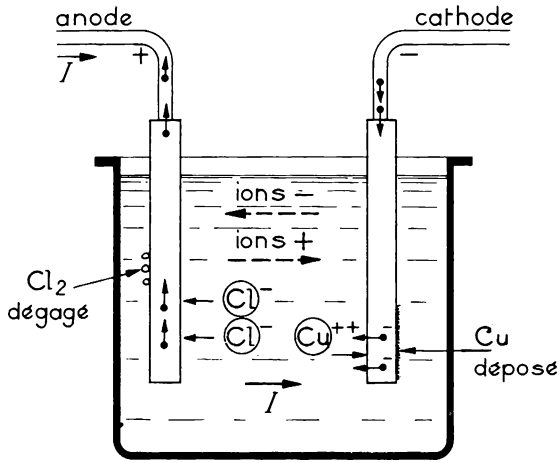



FIG. 6. — Le sens conventionnel du courant $I$ est celui des ions positifs, sens opposé au déplacement des ions négatifs et des électrons.

### 3. — La décomposition de l'électrolyte est généralement accompagnée de réactions secondaires.

L'électrolyse peut donner lieu à une *seule* réaction chimique ; la décomposition de l'électrolyte est simple (*exemple :* $CuCl_2$ entre électrodes inattaquables).

Toutefois, le plus souvent, les produits de cette décomposition donnent des *réactions secondaires* soit avec une électrode, soit avec le solvant, soit entre eux.

Nous nous limiterons à quelques exemples simples.

EXEMPLE 1 : électrolyse avec réaction secondaire sur une électrode; cas du nitrate d'argent avec anode en argent (fig. 7). On observe un dépôt d'argent sur la cathode tandis que l'anode se dissout et disparaît peu à peu (procédé de l'anode soluble utilisé pour argenter des objets).

Dissociation électrolytique : $AgNO_3 \rightarrow Ag^+ + NO_3^-$.

Après décharge des ions sur les électrodes, Ag se dépose à la cathode et $NO_3$ attaque l'anode : $Ag + NO_3 \rightarrow AgNO_3$. L'argent de l'anode est transporté sur la cathode.

EXEMPLE 2 : il en est de même avec sulfate de cuivre et anode de cuivre (procédé de purification électrolytique du cuivre).

$CuSO_4 \rightarrow Cu^{++} + SO_4^{--}$.

A la cathode :

$$Cu^{++} + 2\,e^- = Cu.$$

A l'anode :

$$SO_4^{--} = SO_4 + 2\,e^-$$
$$Cu + SO_4 \rightarrow CuSO_4.$$

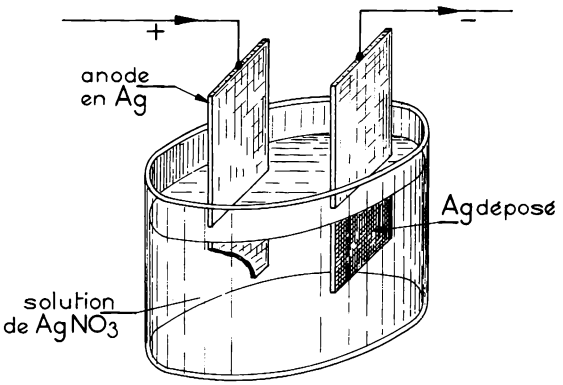



FIG. 7. — Le métal (argent) est déplacé de l'anode sur la cathode : l'anode diminue de poids, la cathode augmente d'autant.

EXEMPLE 3 : électrolyse avec réaction secondaire sur le solvant; solution d'acide sulfurique avec électrodes inattaquables (en charbon ou en platine) (fig. 8).

Dissociation électrolytique :

$$H_2SO_4 \rightarrow 2H^+ + SO_4^{--}.$$

Après décharge des ions, on a :

— à la cathode : $2H \rightarrow H_2$ (molécule)

— à l'anode : $H_2O + SO_4 \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + H_2SO_4$.

Tout se passe comme si l'eau seule était électrolysée.

EXEMPLE 4 : il en est de même dans l'électrolyse de la soude.

Dissociation en solution :

$$NaOH \rightarrow Na^+ + OH^-$$

A la cathode :

$$Na^+ + e^- \rightarrow Na$$
$$Na + H_2O \rightarrow NaOH + \frac{1}{2}H_2.$$

A l'anode :

$$OH^- \rightarrow OH + e^-$$
$$2OH = H_2O + \frac{1}{2}O_2.$$

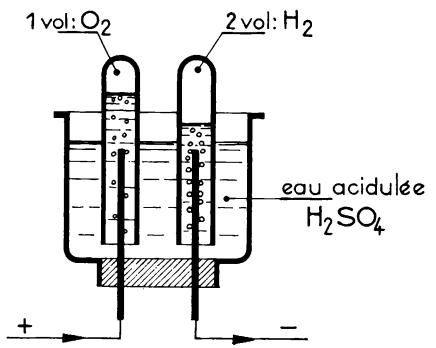



FIG. 8. — L'eau est décomposée en ses constituants.

# B. — Étude quantitative

**1. — La masse *m* de métal ou d'hydrogène recueillie à la cathode est proportionnelle à la quantité d'électricité qui a traversé l'électrolyte.**

On sait que $Q = It$ ; il suffit donc de montrer que $m$ est séparément proportionnelle à $I$ et à $t$.

a) *Mesures à intensité constante : proportionnalité à* t.

Disposons par exemple un voltamètre à eau acidulée aux bornes d'une batterie d'accumulateurs ; un rhéostat permet de maintenir constante l'intensité $I$ du courant (fig. 9).

Notons les volumes $V$ d'hydrogène recueillis à la cathode. Au bout de 3, 6, 9 minutes, nous trouvons 10,5 ; 21 ; 31,5 cm³.

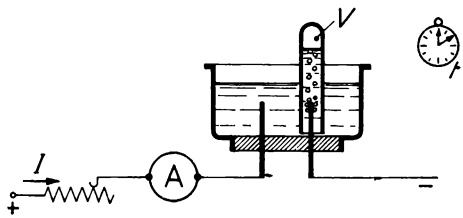



FIG. 9. — $V$ recueillie est proportionnelle au temps $t$ de passage du courant.

CONCLUSION.

*Le volume d'hydrogène — donc sa masse — recueilli dans une électrolyse est proportionnel à la durée de passage du courant.*

b) *Mesures pendant un temps donné : proportionnalité à* I.

Disposons maintenant deux voltamètres à eau acidulée en dérivation suivant le montage de la figure 10. Réglons le courant dans l'une des dérivations à 0,6 A, dans l'autre à 0,3 A. Pour la même durée, nous trouvons :

$$\left.\begin{array}{ll} \text{pour } I_1 = 0{,}6 \text{ A} : & V_1 = 18 \text{ cm}^3 \\ \text{pour } I_2 = 0{,}3 \text{ A} : & V_2 = 9 \text{ cm}^3 \end{array}\right\} \quad \frac{V_1}{I_1} = \frac{V_2}{I_2}$$

CONCLUSION.

*Le volume d'hydrogène — donc sa masse — recueilli dans une électrolyse est proportionnel à l'intensité du courant.*

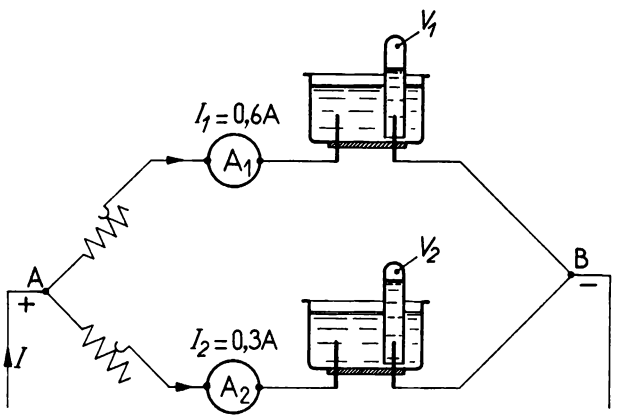



FIG. 10. — $V_1$ et $V_2$ sont proportionnels à $I_1$ et $I_2$.

On trouve les mêmes résultats en pesant des cathodes sur lesquelles s'est déposé un métal, d'où la première **loi de Faraday** (1833) :

**1re loi.** — *La masse de métal (ou d'hydrogène) recueillie à la cathode d'un voltamètre est proportionnelle à l'intensité* I *du courant et au temps* t, *donc à leur produit* Q = It *(quantité d'électricité).*

## 2. — Une même quantité d'électricité libère, à la cathode de voltamètres quelconques, le même nombre de valences-grammes.

On appelle *valence-gramme* d'un élément le quotient $\frac{A}{n}$ de sa masse atomique $A$ par sa valence $n$ dans l'électrolyte utilisé.

*a*) Disposons en série plusieurs voltamètres, de dimensions quelconques, d'électrodes différentes, contenant des solutions aqueuses de concentrations différentes, d'un *même électrolyte* : par exemple du sulfate de cuivre (fig. 11).

Au bout d'un temps quelconque, les augmentations de masses mesurées sur les diverses cathodes sont égales.

CONCLUSION.

*La masse de métal déposée ne dépend ni des dimensions du voltamètre ou des électrodes, ni de la concentration de l'électrolyte.*

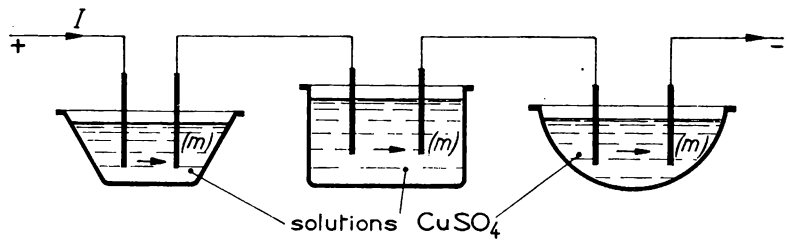



FIG. 11. — Pour un même électrolyte, la masse déposée ne dépend pas de la géométrie des électrolyseurs.

*b*) Disposons maintenant en série des voltamètres à électrolytes différents (fig. 12) : à solution aqueuse d'acide sulfurique, de sulfate de cuivre, de nitrate d'argent, de chlorure d'aluminium.

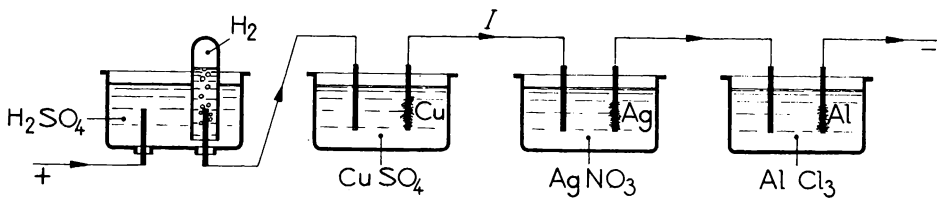



FIG. 12. — Valence-gramme = $\frac{\text{masse atomique}}{\text{valence}}$.

Pour les électrolytes nommés, il apparaît sur les cathodes : de l'hydrogène, du cuivre, de l'argent, de l'aluminium.

Si nous relevons, au bout d'un temps $t = 32$ minutes, les masses déposées $m$ pour un courant constant $I = 0{,}50$ A, nous obtenons le tableau suivant :

| *Nature du corps produit à la cathode.* | hydrogène (H) | argent (Ag) | cuivre (Cu) | aluminium (Al) |
|---|---|---|---|---|
| *Masse atomique* A | 1 | 108 | 63 | 27 |
| *Valence* n | 1 | 1 | 2 | 3 |
| *Valence-gramme* $\frac{A}{n}$ | $\frac{1}{1} = \mathbf{1}$ g | $\frac{108}{1} = \mathbf{108}$ g | $\frac{63}{2} = \mathbf{31{,}5}$ g | $\frac{27}{3} = \mathbf{9{,}0}$ g |
| *Masse* m *du corps produit* | 0,010 g | 1,08 g | 0,315 g | 0,090 g |
| *Nombre de valences-grammes libérées* | $\frac{0{,}010}{\mathbf{1}} = 0{,}010$ | $\frac{1{,}08}{\mathbf{108}} = 0{,}010$ | $\frac{0{,}315}{\mathbf{31{,}5}} = 0{,}010$ | $\frac{0{,}090}{\mathbf{9{,}0}} = 0{,}010$ |

On recueille, dans chaque voltamètre, 0,010 valence-gramme du corps apparu à la cathode. Il en est de même pour un élément (chlore, oxygène...) qui apparaît à l'anode. D'où la **seconde loi de Faraday :**

*La masse d'un élément libérée par une quantité donnée d'électricité est proportionnelle à la valence-gramme* A/n *de cet élément.*

### 3. — Formule de Faraday.

*a*) En rassemblant les deux lois précédentes, on trouve

$$m = \frac{1}{F}\frac{A}{n}It,$$

où $F$ est une constante valable pour tous les éléments ; pour $m = \frac{A}{n}$, on trouve $F = It$.

*b*) Cette quantité d'électricité qui libère une valence-gramme a été mesurée avec précision en électrolysant une solution de *nitrate d'argent* (1). On a trouvé

$$F = 96\,490 \approx 96\,500 \text{ coulombs.}$$

Il n'est pas possible, dans les expériences courantes, d'obtenir une telle précision.

*Pour faire un calcul et à titre indicatif*, nous trouvons dans l'expérience du § *b* :

$$Q = 0{,}50 \times (60 \times 32) = 960 \text{ C.}$$

(1) Le nitrate d'argent se prête à des mesures précises, car c'est un des rares électrolytes dont la décomposition est exprimée rigoureusement par une seule équation chimique ; sa masse atomique est exactement 107,87 (Union Internationale de Chimie, 1961).

Cette quantité d'électricité dépose 1,08 gramme d'argent ; pour une valence-gramme, on trouve :

$$\frac{960 \times 108}{1{,}08} = 96\,000 \text{ C},$$

soit un écart de 0,51 % seulement avec la valeur exacte.

*c*) **Formule de Faraday (1).**

Elle exprime la masse $m$ d'un élément, obtenue dans une électrolyse :

$$\boxed{m = \frac{1}{96\,500}\frac{A}{n}It}$$

$m$ en gramme.
$A$ masse atomique (en gramme).
$n$ valence.
$I$ en ampère.
$t$ en seconde.

REMARQUE.

Lorsque la cuve est traversée par 1 coulomb, $It = 1$ coulomb, et on trouve pour l'argent :

$$m = \frac{1}{96\,500} \times \frac{107{,}87}{1} \times 1 = 0{,}001118 \text{ g ou } 1{,}118 \text{ mg}.$$

C'est bien la définition donnée pour le coulomb (chapitre V, § A 4).

## 4. — Bilan énergétique de l'électrolyse.

*a*) Le passage du courant à travers la cuve à électrolyse s'accompagne d'un dégagement de chaleur : celui-ci est dû à une *résistance interne* qui dépend de l'électrolyte lui-même, de sa concentration, des dimensions de la cuve et des électrodes.

Si $r$ est la résistance interne, la puissance dépensée en chaleur est :

$$P_j = rI^2.$$

*b*) L'effet de l'électrolyse se traduisant par la formation de produits différents de l'électrolyte et des électrodes, une partie de l'énergie électrique reçue de la source est transformée en énergie chimique $P_u$ utile.

Par définition le quotient $\frac{P_u}{I}$ est appelé force contre-électromotrice $E'$ (p. 128).

$$\frac{P_u}{I} = E' \qquad \text{ou} \qquad P_u = E'I.$$

(1) FARADAY (1791-1867). Physicien anglais célèbre par ses travaux sur l'électrolyse et la décharge électrique à travers les gaz.

*c*) La puissance électrique totale consommée par la cuve à électrolyse sous une différence de potentiel appliquée $U$ et un courant $I$, est :

$$P = UI.$$

*d*) Le bilan des puissances en jeu s'écrit :

$$P = P_u + P_j$$

ou

$$UI = E'I + rI^2,$$

soit en divisant par $I$ :

$$U = E' + rI$$

ou encore

$$\boxed{E' = U - rI.}$$

C'est la loi des récepteurs à f. c. é. m., étudiée au chapitre XII, § C.

# C. — Applications industrielles

1° *Dans l'industrie chimique :*

— préparation d'oxygène, hydrogène, chlore, soude.

2° *Dans la métallurgie :*

— préparation de l'aluminium (Al) par électrolyse de l'alumine fondue dans de la cryolithe : il faut fondre d'abord le produit à haute température et ensuite le maintenir à l'état liquide ;
— préparation du sodium (Na), du magnésium (Mg) ;
— production et raffinage électrolytique du cuivre, du zinc, par électrolyse des sulfates.

3° *Recouvrements électrolytiques :*

*a*) dépôts métalliques : argenture, nickelage, chromage, cuivrage, dorure ;
*b*) galvanoplastie : reproduction d'objets à partir de moules.

# D. — Exercices résolus

**1.** *Dans une cuve à électrolyse à nitrate d'argent, on veut recouvrir un objet d'une couche d'argent dont la masse déposée doit être de 10 grammes. Sachant que l'intensité est* I = 2,5 *ampères, quelle est la durée de l'opération ? La masse atomique* A *de l'argent est 108 et sa valence* n = 1.

**Solution.**

Nous savons que le métal se dépose sur la cathode ; l'objet doit donc servir de cathode; on a :

$$m = \frac{1}{96\,500}\,\frac{A}{n}\,It = \frac{108 \times 2{,}5}{96\,500}\,t.$$

Nous en tirons :

$$t = \frac{10 \times 96\,500}{108 \times 2{,}5} = 3\,574 \text{ s} = 59 \text{ mn } 34 \text{ s}.$$

**2.** *Quels sont les volumes d'hydrogène et d'oxygène dégagés par le passage d'un courant de 3 ampères pendant une heure dans un voltamètre à eau acidulée?*

*On rappelle qu'une mole de gaz pur occupe 22,4 litres dans les conditions normales de température et de pression, c'est-à-dire à 0 °C et 760 millimètres de mercure.*

**Solution.**

La quantité d'électricité qui traverse le voltamètre est :

$$Q = It = 3 \times 3\,600 = 10\,800 \text{ coulombs.}$$

Or 96 500 coulombs fournissent 1 valence-gramme d'hydrogène, soit $\frac{A}{n} = 1$ g occupant 0,5 volume moléculaire puisque $H_2 = 2$.

On obtient donc pour la quantité $Q$ qui a traversé le voltamètre, un volume :

$$V = \frac{11\,200 \times 10\,800}{96\,500} = 1\,252 \text{ cm}^3 \text{ d'hydrogène.}$$

Mais le volume d'oxygène dégagé étant deux fois plus petit que celui d'hydrogène, on a finalement un volume d'oxygène de 626 cm³.

## PROBLÈMES DE LA LEÇON XIII

**1.** Une installation industrielle d'électrochimie produit 500 kilogrammes de cuivre en 24 heures par électrolyse du sulfate de cuivre $Cu\,SO_4$ : quelle est l'intensité $I$ du courant dans les cuves ? On donne Cu = 64 grammes ; valence du cuivre $n = 2$.

**Réponse : $I = 17\,450$ A.**

**2.** 1° Dans un laboratoire, on veut obtenir 1 litre d'hydrogène (sous 0 °C et 760 mm de mercure) par électrolyse d'une solution aqueuse de soude ; on dispose d'un courant $I = 4$ ampères. Quel est le temps $t$ nécessaire à l'opération ?

2° Avec le même courant traversant un voltamètre à eau acidulée, quel serait le volume $v$ d'oxygène dégagé en une heure ?

**Réponses : 1° $t = 2\,154$ s (35 mn 54 s) ; 2° $v \approx 836$ cm³.**

**3.** On veut recueillir 8 milligrammes d'hydrogène dans l'éprouvette placée à la cathode d'un voltamètre à eau acidulée. L'intensité du courant est réglée à 1 ampère. Calculer le temps $t$ nécessaire.

**Réponse : $t = 12$ mn 52 s $\approx 13$ mn.**

**4.** On électrolyse une solution de sel d'argent entre électrodes d'argent, et au bout de 16 minutes 5 secondes il s'est déposé à la cathode 216 milligrammes d'argent.

1° Sachant que l'argent est monovalent, que Ag = 108 grammes, et en prenant pour valeur du faraday 96 500 coulombs, calculer l'intensité du courant supposée constante.

2° Combien faudrait-il de temps pour déposer la même masse d'or avec le même courant, sachant que l'or est trivalent et que Au = 197 grammes ?

*(Admission E. S. M. Saint-Cyr ; option Histoire et Géographie : Sc. physiques 1967.)*

**Réponses : 1° $I = 0{,}20$ A ; 2° $t = 26$ mn 27 s.**

**5.** On veut déposer, par électrolyse d'une solution de sel de chrome, une couche $e = 0{,}2$ millimètre de chrome sur toute la surface d'une sphère d'acier, ayant un diamètre $d = 0{,}10$ mètre.

Quelle est l'intensité du courant nécessaire, si la durée de l'électrolyse est $t = 4$ heures ?

On donne pour le chrome : masse atomique, 52 grammes ; valence, 3 ; masse spécifique, 7,1 grammes par centimètre cube.

**Réponse : $I = 17{,}2$ A.**

**6.** Pour fabriquer de l'aluminium, on utilise une cuve formant cathode qui contient un mélange d'alumine ($Al_2O_3$) et d'un fondant destiné à abaisser la température de fusion de l'électrolyte. L'anode est en carbone ; l'oxygène qui se dégage à son contact est transformé en oxyde de carbone CO.

La différence de potentiel aux bornes de la cuve est de 4 volts, le courant qui la traverse a une intensité de 100 000 ampères.

La cuve a une force contre-électromotrice de 2 volts et une résistance interne $r$. On demande :

1° La résistance $r$ de la cuve et la puissance électrique dissipée par effet Joule dans la cuve.

2° Le temps nécessaire pour obtenir 1 tonne d'aluminium.

3° La masse de charbon anodique consommé et le volume d'oxyde de carbone formé pendant ce même temps, ce volume étant ramené à la température de 0 °C et à la pression atmosphérique normale.

*Nota.* — Masses atomiques : Al = 27 ; C = 12 ; on rappelle que la molécule-gramme d'un corps gazeux occupe 22,4 litres dans les conditions normales de température et de pression.

*(Bacc., Sc. physiques, C. et M., 1960.)*

**Réponses : 1° $r = 20$ μΩ ; $P = 200$ kW ; 2° $t = 29$ h 47 mn ; 3° $m$ (charbon) $= 667$ kg ; $v$ (oxyde de carbone) $= 1\,240$ m³.**

**7.** Un générateur est constitué par 20 piles identiques disposées en série ; chaque pile a une force électromotrice de 1 volt et une résistance intérieure de 0,5 ohm.

1° On branche ce générateur sur un voltamètre à eau acidulée de résistance 2 ohms et de force contre-électromotrice 1,5 volt. Calculer l'intensité du courant et le volume d'oxygène dégagé à l'anode en 5 minutes (ce volume est mesuré à la température de 0° C et sous la pression de 76 centimètres de mercure).

2° On place maintenant deux voltamètres identiques au précédent, en parallèle, entre les bornes du même générateur.
Quel est le volume d'hydrogène dégagé à la cathode dans l'un des voltamètres en 5 minutes (ce volume est mesuré dans les mêmes conditions que le précédent) ?

3° On fait débiter sur une résistance $R = 2{,}5$ ohms, successivement les trois générateurs suivants :
*a*) Les 20 piles associées en série.
*b*) Les 20 piles associées en parallèle.
*c*) Les 20 piles associées en deux séries de 10 que l'on groupe en parallèle.
Calculer dans chacun de ces trois cas : la puissance dissipée en chaleur dans la résistance $R$ et la puissance fournie par l'ensemble des piles.

*(Bacc. 1re partie, C. et M.; 1959.)*

**Réponses : 1° $I_1 = 1{,}54$ A ; $v$ (oxygène) $= 26{,}8$ cm³ ; 2° $I_2 = 1{,}68$ A ; $v$ (hydrogène) $\approx 29$ cm³ ; 3° En série : $P_d = 6{,}4$ W ; $P_t = 32$ W ; en parallèle : $P_d = 0{,}4$ W ; $P_t = 0{,}39$ W ; en mixte : $P_d = 10$ W ; $P_t = 20$ W.**

# XIV. — GÉNÉRATEURS CHIMIQUES

**MATÉRIEL UTILISÉ :**

— 2 lames de cuivre identiques
— 2 lames de zinc identiques ;
— 2 lames de fer ;
— 2 lames de plomb ;
— 1 lame de charbon ;
— acide sulfurique et soude ;
— cristallisoir ;
— accumulateur ;
— voltmètre sensible ;
— milliampèremètre ;
— piles usuelles ;
— commutateur.

## A. — Piles

### 1. — PRINCIPE

Plongeons dans une solution d'acide sulfurique :

*a*) **Deux électrodes identiques** (fig. 1) ; le voltmètre relié aux bornes de ces électrodes n'indique aucune déviation.

*b*) **Deux électrodes de natures différentes** (fig. 2).

Avec du cuivre et du zinc et une solution à 10 %, le voltmètre dévie et indique environ **1** volt ; le courant circule du cuivre au zinc à l'extérieur de l'électrolyte.

Il apparaît donc une force électromotrice entre deux lames de natures *différentes* plongeant dans de l'eau acidulée : ce dispositif est appelé **pile**.

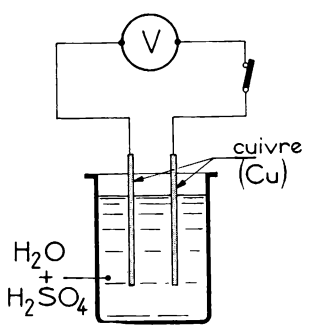



FIG. 1. — Électrodes identiques : pas de force électromotrice.

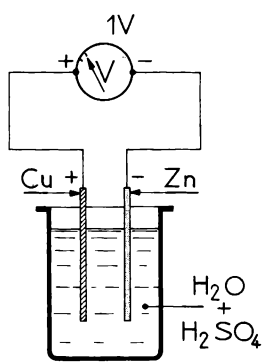



FIG. 2. — Électrodes différentes : existence d'une f. é. m.; le zinc disparaît progressivement. L'énergie électrique provient de l'énergie chimique libérée par la réaction :

$$H_2SO_4 + Zn \rightarrow ZnSO_4 + H_2.$$

CONCLUSION.

*Une* **pile** *est un générateur qui transforme directement l'énergie* **chimique** *d'une réaction en énergie électrique; elle est constituée de deux électrodes de natures différentes plongeant dans un électrolyte.*

REMARQUE.

La première réalisation expérimentale de ce genre fut faite par Volta (1) en superposant (c'est-à-dire en *empilant*) des rondelles de zinc, de feutre imprégné d'eau acidulée, et de cuivre : d'où l'expression « pile ».

## 2. — FORCE ÉLECTROMOTRICE

*a*) La f. é. m. d'une pile ne varie pas quand on modifie l'écartement des électrodes, leur surface de contact avec l'électrolyte, la concentration de cet électrolyte.

Modifions (fig. 3) dans le montage existant, le positionnement des électrodes et leur partie immergée : l'indication du voltmètre reste la même.

*b*) Remplaçons l'eau acidulée utilisée comme électrolyte par une solution de potasse, les électrodes restant les mêmes, cuivre et zinc (fig. 4) : le voltmètre dévie, la f. é. m. n'est plus que **0,7** volt.

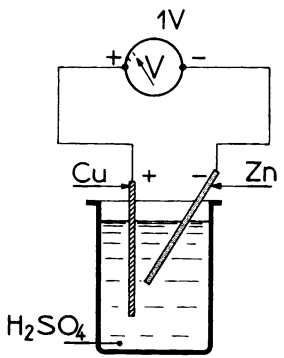



FIG. 3. — La mesure de la f. é. m. est de 1 volt ; elle ne dépend ni de la profondeur de la partie immergée des électrodes, ni de la concentration de l'électrolyte.

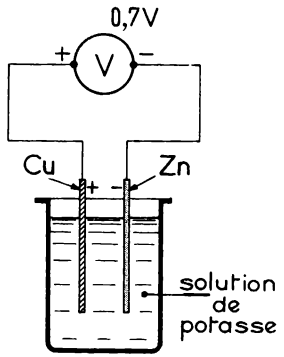



FIG. 4. — La f. é. m. est 0,7 volt ; elle dépend de la nature de l'électrolyte.

*c*) Changeons l'une des électrodes. Conservons l'électrode de cuivre, l'eau acidulée, et utilisons pour l'autre, successivement, du plomb, puis du charbon ; on obtient les forces électromotrices :

| | |
|---|---|
| cuivre et plomb | $\approx$ 0,4 volt ; |
| cuivre et charbon | = 0,2 mais avec inversion de la f. é. m. |

(1) *Voir* Leçon VII, § A 3.

D'autres essais donnent, par exemple avec les chaînes électrodes-électrolytes ci-dessous :

Zinc — $H_2SO_4$ — platine : 0,82 V
Zinc — KOH — fer : 1,5 V
Zinc — KOH — oxyde cuivrique : 0,9 V.

CONCLUSION.

*La force électromotrice d'une pile dépend :*
*— en grandeur et en sens, de la nature des électrodes ;*
*— en grandeur, de la nature de l'électrolyte.*

Par contre, *la résistance interne et la puissance dépendent des dimensions des électrodes, de leur écartement et de la concentration de l'électrolyte.*

## 3. — PILES USUELLES

Les expériences précédentes montrent que le courant obtenu est de courte durée ; si on laisse débiter la pile de façon continue dans un circuit extérieur, la déviation du voltmètre baisse très rapidement jusqu'à zéro, manifestant la disparition de la f. é. m.

L'accumulation de bulles d'hydrogène autour de la lame de cuivre a constitué comme une gaine gênant l'électrolyse : on dit qu'il y a **polarisation** de la pile.

Dans les piles industrielles, on évite la polarisation par divers moyens correspondant aux types suivants :

— pile à dépolarisant ;
— pile impolarisable ;
— pile « autodépolarisante ».

### 1. — Pile à dépolarisant (type Leclanché par exemple) (fig. 5 *a*).

L'électrolyte est du chlorure d'ammonium ($NH_4Cl$) ; l'électrode négative est en zinc ; l'électrode positive, en charbon (carbone pur), est enveloppée d'un vase poreux rempli de bioxyde de manganèse ($MnO_2$) dont le rôle est de se combiner à l'hydrogène qui se forme (fonction de dépolarisant).

Elle est plus connue dans le commerce sous la forme « pile sèche », l'électrolyte n'étant plus liquide mais sous forme de gelée (fig. 5 *b*).

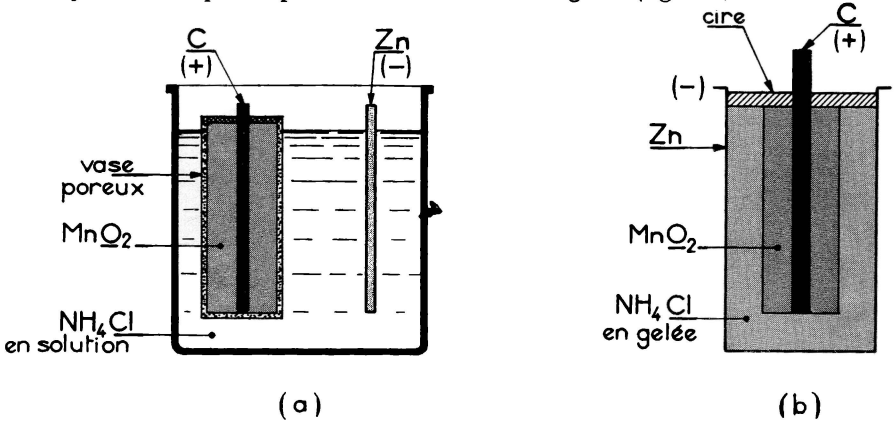



FIG. 5. — *a*) Pile Leclanché à électrolyte liquide. *b*) Pile « sèche » type Leclanché. Force électromotrice : 1,5 volt.

La forme la plus courante comporte 3 éléments fournissant 4,5 volts, avec une capacité de 1 ampère-heure environ.

**2. — Pile impolarisable** (type Daniel) (fig. 6).

Chaque électrode métallique est immergée dans la solution d'un de ses sels, les deux sels correspondant au même acide. Par exemple, dans la pile Daniel (fig. 6) les électrodes, cuivre et zinc, sont immergées chacune dans son sulfate.

L'électrolyse produit du cuivre qui se dépose sur l'électrode de cuivre et transforme le zinc en sulfate de zinc : *aucun des deux contacts électrode - électrolyte n'est modifié et la f. é. m. demeure donc constante* (1,08 V).

L'énergie provient de la réaction $CuSO_4 + Zn \rightarrow ZnSO_4 + Cu$, facile à voir directement en plongeant une lame de zinc dans une solution de sulfate de cuivre.

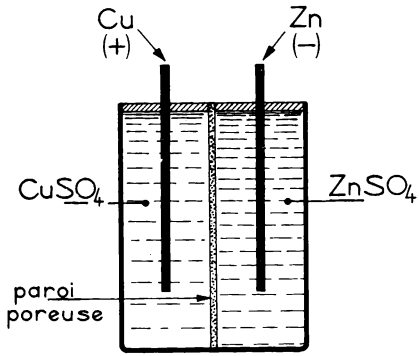



FIG. 6. — Pile « impolarisable » type Daniel.

**3. — Pile à mercure « autodépolarisante ».**

Elle utilise l'énergie de la réaction :

$$Zn + HgO \rightarrow ZnO + Hg$$

en présence d'eau, qui transforme l'oxyde de zinc en hydroxyde $Zn(OH)_2$.

La f. é. m. de 1,35 volt par élément est *très stable*. Un gramme d'oxyde mercurique et 0,3 gramme de zinc correspondent à une capacité de 0,25 Ah. A volume égal, les piles au mercure ont une capacité 3 à 4 fois supérieure à celle des piles sèches habituelles ; on les utilise dans les matériels de mesure, les matériels médicaux (appareils de surdité), scientifiques (photographie...).

# B. — Accumulateurs

Quand une pile est usée, on ne peut régénérer les produits initiaux : les réactions d'une pile usuelle sont *irréversibles*.

Il existe cependant des piles rechargeables, à réactions *réversibles*, et que l'on appelle **accumulateurs**.

## I. — EXPÉRIENCE PRÉLIMINAIRE

Soit un voltamètre à électrodes *identiques* en fer et à solution de soude (fig. 7) ; il peut être mis, soit en série avec un générateur S, soit fermé directement sur l'ampèremètre à zéro médian, au moyen du commutateur K.

*a*) K étant placé sur la position (1), S débite dans le voltamètre : l'ampèremètre est traversé par le courant d'alimentation $I_1$ ; il dévie, vers la droite par exemple.

Laissons passer le courant quelques instants, un dégagement gazeux apparaît : de l'hydrogène à la cathode, de l'oxygène à l'anode.

*b*) K étant placé sur la position (2) :

S est hors circuit ; on constate cependant le passage d'un courant $I_2$ de sens contraire au précédent et à décroissance très rapide.

## 2. — INTERPRÉTATION

Dans la première phase, correspondant à la position 1, le voltamètre *absorbe* de l'énergie électrique qu'il met en réserve sous formes de produits chimiques apparaissant sur les électrodes ; l'électrolyse a *modifié* en surface l'aspect et la nature chimique des électrodes : gaine d'oxygène et fer légèrement oxydé sur l'électrode positive, gaine d'hydrogène sur l'électrode négative.

Dans la deuxième phase, correspondant à la position 2, l'énergie chimique est *restituée* en partie, sous forme d'énergie électrique ; les produits accumulés sur les électrodes disparaissent peu à peu et les électrodes redeviennent identiques (inversion des dégagements gazeux puisque $I_2$ est de sens opposé à $I_1$, donc réaction $H_2 + O \rightarrow H_2O$ sur chaque électrode).

*La différenciation des électrodes explique donc l'énergie en réserve et la force électromotrice dans le fonctionnement en générateur.*

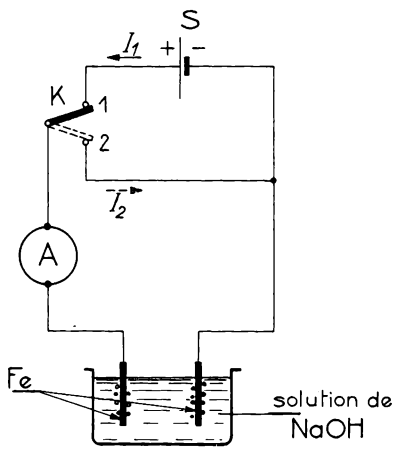



FIG. 7. — **Différenciation des électrodes d'un électrolyseur.** Un courant $I_2$, de sens contraire à $I_1$, est décelé malgré l'élimination de S.

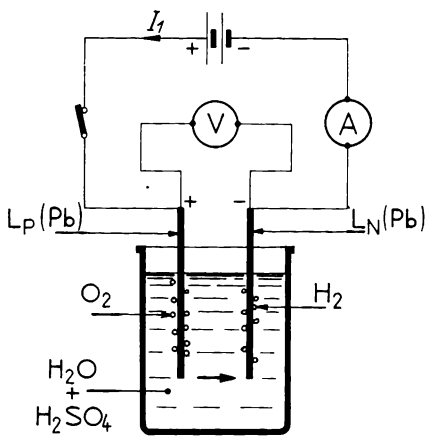



FIG. 8. — FORMATION D'UN ACCUMULATEUR. En multipliant les charges et les décharges, on emmagasine de plus en plus d'énergie dans les plaques de plomb de l'électrolyseur (à la longue, coloration brunâtre de $L_P$).

## 3. — PRINCIPE DES ACCUMULATEURS AU PLOMB

### *a*) Expérience : formation d'un accumulateur.

Recommençons l'expérience précédente avec deux lames $L_P$ et $L_N$ de plomb (fig. 8) plongeant dans une solution d'acide sulfurique ; *à condition de répéter un grand nombre de fois* les opérations sur la position 1 puis sur la position 2, on observe des modifications de plus en plus profondes des lames :

pendant le fonctionnement en voltamètre — c'est-à-dire la **charge** — une énergie plus grande est mise en réserve sous forme chimique, puis restituée pendant le fonctionnement en générateur — c'est-à-dire la **décharge**.

*b*) **Nature des plaques.**

Le procédé de formation précédent, long et peu efficace, n'est pas utilisé. Pratiquement, par construction (fig. 9) :

— Les plaques positives comportent du péroxyde de plomb $PbO_2$ ;

— Les plaques négatives sont formées par du plomb pur spongieux Pb.

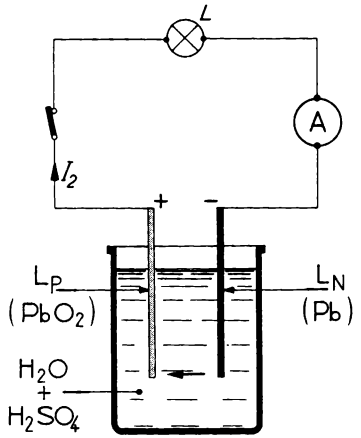



FIG. 9. — L'ensemble formé par les deux lames d'accumulateur réel se comporte comme un générateur : la lampe *L* brille.

*c*) **Théorie de la double sulfatation.**

Ainsi nommée parce qu'elle explique la décharge par la transformation de $PbO_2$ (pôle +) **et** Pb (pôle —) en sulfate de plomb $PbSO_4$.

En solution, l'acide sulfurique est dissocié en ions :

$$H_2SO_4 \rightarrow 2H^+ + SO_4^{--}.$$

Aussi bien pour la charge (courant $I_1$, fig. 8) que pour la décharge (courant $I_2$, fig. 9) : les ions $H^+$ descendent le courant et se déchargent sur l'électrode de sortie ; les ions $SO_4^{--}$ remontent le courant et se déchargent sur l'électrode d'entrée (plaque + pour $I_1$, plaque — pour $I_2$). En outre des réactions secondaires transforment les électrodes :

— *Pendant la décharge :*

$$\underset{\text{pôle }+}{PbO_2} + 2e^- + \underbrace{2H^+}_{2H} + \underbrace{(2H^+,\ SO_4^{--})}_{H_2SO_4} \rightarrow \underset{(+)}{\mathbf{PbSO_4}} + 2H_2O \quad \Big\| \quad \underset{\text{pôle }-}{Pb} + SO_4^{--} \rightarrow \underset{(-)}{\mathbf{PbSO_4}} + 2e^-$$

Le pôle + cède 2 électrons et le pôle — en reçoit 2 ; progressivement, les électrodes deviennent identiques ($PbSO_4$) ; la f.é.m. et la concentration en acide de la solution diminuent.

— *Pendant la charge :*

$$\underset{(+)}{PbSO_4} + SO_4^{--} + 2H_2O \rightarrow \underset{(+)}{\mathbf{PbO_2}} + 2(2H^+,\ SO_4^{--}) + 2e^- \quad \Big\|$$

$$\underset{(-)}{PbSO_4} + \underbrace{2H^+ + 2e^-}_{2H} \rightarrow \underset{(-)}{\mathbf{Pb}} + (2H^+,\ SO_4^{--}) \quad \Big\|$$

Le pôle + reçoit 2 électrons, le pôle — en perd 2 ; les électrodes redeviennent différentes ($PbO_2$ et Pb) ; la f.é.m. et la concentration en acide augmentent.

REMARQUE.

1° La dernière équation peut être simplifiée par suppression de $2H^+$ dans chaque membre : $PbSO_4 + 2e^- \rightarrow Pb + SO_4^{--}$

Mais alors elle ne rend plus compte du transport des charges par les ions $H^+$. De même pour la première équation de charge.

2° En simplifiant au maximum, la théorie de la double sulfatation est représentée par la réaction *réversible :*

$$\underset{+}{PbO_2} + 2H_2SO_4 + \underset{-}{Pb} \underset{\text{charge}}{\overset{\text{décharge}}{\rightleftarrows}} \underset{+}{PbSO_4} + 2H_2O + \underset{-}{PbSO_4}$$

$$\underset{+}{\uparrow}\!\!____ 2e^- ____\!\!\downarrow\underset{-}{} \qquad \underset{+}{\uparrow}\!\!____ 2e^- ____\!\!\downarrow\underset{-}{}$$

# C. — Accumulateurs au plomb : réalisation industrielle

## I. — CONSTITUTION

Examinons un élément d'accumulateur (fig. 10).

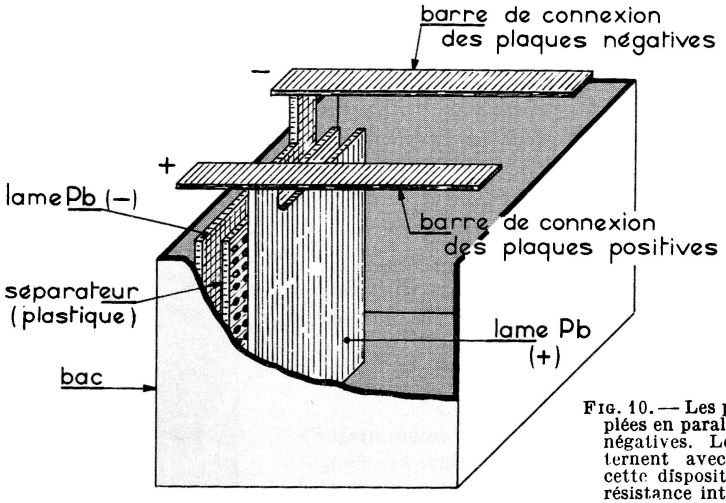



FIG. 10. — Les plaques positives sont couplées en parallèle, ainsi que les plaques négatives. Les plaques positives alternent avec les plaques négatives; cette disposition permet d'obtenir une résistance interne très petite.

*a*) Dans un même bac, en matière isolante et inattaquable, rempli d'acide sulfurique étendu d'eau, sont disposées verticalement des plaques de plomb ; chaque plaque positive est placée entre deux plaques négatives, les plaques de même nom étant reliées entre elles par une barre de connexion pour former un ensemble couplé en parallèle ; l'écartement entre deux plaques est assuré par un *séparateur* en bois, en plastique...

**Éléments d'accumulateur.**
*(Document Tudor.)*

*b*) **Plaques positives.**

Réalisées en plomb pur, chacune d'une seule pièce ; chaque face est striée par de très nombreuses lames verticales de façon à en augmenter la *surface active* recouverte d'une couche mince d'oxyde de plomb $PbO_2$ de couleur brun-rouge.

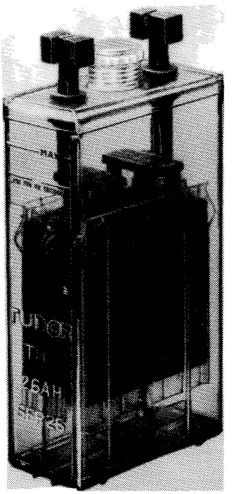
*c*) **Plaques négatives.**

Chacune d'elles est formée de deux grilles de plomb, très voisines l'une de l'autre, à larges mailles remplies de caissons contenant la matière active sous forme de plomb pur spongieux.

*d*) **Électrolyte.**

Le liquide recouvrant les plaques est de l'eau distillée additionnée d'acide sulfurique très pur ; un pèse-acide permet d'en contrôler la densité qui doit être de 24 à 28° Baumé normalement pour un accumulateur en bon état.

L'électrolyte est contenu dans des bacs en verre ou en matière isolante, moins lourde et plus résistante, suivant les utilisations en postes fixes ou en batteries transportables.




**Un élément d'accumulateur :** positionnement des plaques dans l'électrolyte. *(Document Tudor.)*

## 2. — CONSTANTES D'UN ACCUMULATEUR AU PLOMB

*a*) **Charge.**

La courbe de la f. c. é. m. d'un élément pendant la durée de charge atteint rapidement un palier sensiblement horizontal pour 2,1 volts ; en fin de charge, un bouillonnement se produit, dû à l'excès de dégagement d'oxygène à l'anode et d'hydrogène à la cathode ; la f. c. é. m. atteint 2,5 volts ; il faut à ce moment arrêter la charge (fig. 11).

*b*) **Décharge.**

La f. é. m. décroît rapidement de 2,5 volts à 2,1 volts pendant le début de l'utilisation, puis se maintient sensiblement constante à cette dernière valeur ; elle décroît à nouveau brusquement en fin de décharge, jusqu'à 1,8 volt, valeur que l'on doit considérer comme limite inférieure pour éviter toute détérioration : il se produirait d'autres réactions, *irréversibles.*

Pratiquement, on réunit en série *n* éléments, pour réaliser une batterie de f. é. m. *n* fois plus grande.

*c*) **Résistance interne.**

Un accumulateur au plomb, en bon état, a une résistance interne très faible, de l'ordre de 0,01 ohm.

*d*) **Capacité.**

C'est la quantité d'électricité maximale qu'un élément peut fournir pendant la décharge ; elle s'évalue en ampères-heures ; elle est voisine de 10 Ah par kilogramme de matière active.

Une batterie d'automobile, par exemple, peut atteindre 100 Ah ; la durée de décharge est de l'ordre de 10 heures en fonctionnement normal.

REMARQUE. — La *capacité massique* est l'énergie disponible par kilogramme d'accumulateur. Elle est de 30 à 40 Wh/kg et dépend du régime de décharge.

*e*) **Rendement.**

On distingue :

— *le rendement en quantité* — C'est le rapport de la quantité d'électricité fournie à la décharge à la quantité d'électricité absorbée pendant la charge :

$$\eta_q = \frac{Q_d}{Q_c}.$$

il est de l'ordre de 0,9.

— *le rendement en énergie* — C'est le rapport de l'énergie fournie pendant la décharge à l'énergie absorbée pendant la charge :

$$\eta_w = \frac{W_d}{W_c}.$$

il est de l'ordre de 0,75.

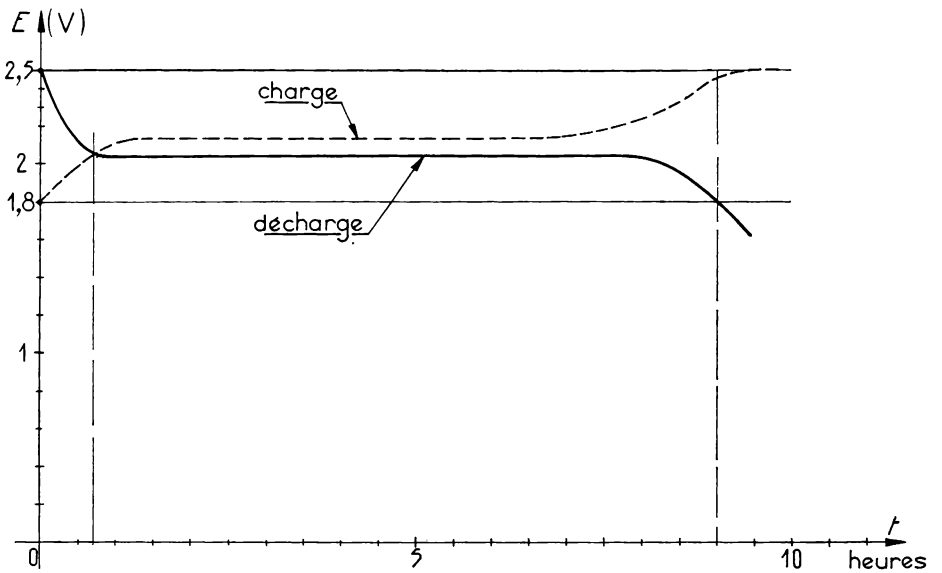



FIG. 11. — Caractéristiques : de la charge (trait pointillé), de la décharge (trait plein), d'un élément d'accumulateur au plomb.

— *Le rendement en énergie est le produit du rendement en tension par le rendement en quantité.*

En effet on a :

énergie à la décharge : $W_d = EIt = EQ_d$,

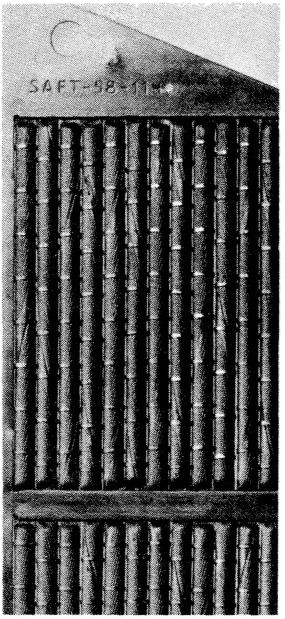
énergie à la charge : $W_c = E'I't' = E'Q_c$.

or $$\eta_w = \frac{W_d}{W_c} = \frac{EQ_d}{E'Q_c}$$

d'où $$\boxed{\eta_w = \frac{E}{E'}\,\eta_q.}$$

Avec $E = 2{,}1$ V, $E' = 2{,}5$ V, $\eta_q = 0{,}9$,

on trouve : $$\eta_w = \frac{2{,}1}{2{,}5} \times 0{,}9 \approx 0{,}76.$$




Vue partielle d'une plaque positive d'accumulateur alcalin, montrant l'assemblage des tubes finement perforés contenant la matière active.
*(Document S.A.F.T.)*

# D. — Accumulateurs alcalins

Le plus connu des accumulateurs alcalins est l'accumulateur fer-nickel ; l'électrolyte est une solution de potasse caustique (KOH) à 20 %.

La matière active de l'anode en nickel est de l'oxyde de nickel ; celle de la cathode est un mélange de fer finement divisé et de cadmium.

La force électromotrice d'un élément est de l'ordre de 1,2 volt.

Ils ont l'inconvénient d'une f. é. m. plus faible et moins stable que celle d'un accumulateur au plomb, mais les avantages d'être plus légers et robustes, aussi d'avoir une durée supérieure d'utilisation.

# E. — Exercices résolus

**1.** *Une batterie d'accumulateurs, de force électromotrice 6 volts, débite pendant une demi-heure dans un circuit, un courant de 2 ampères. Quelle est l'énergie totale fournie par cette batterie ?*

**Solution**

Tout générateur produit une énergie totale donnée par :

$$W = EIt. \text{ (J, V, A, s)}$$

On a donc :

$$W = 6 \times 2 \times 1\,800 = 21\,600 \text{ J.}$$

(Ou bien : $Q = It = 2 \times 0{,}5 = 1$ Ah ; $W = EQ = 6 \times 1 = 6$ Wh).

**2.** *Un élément d'accumulateur a pour capacité 150 Ah et un rendement en énergie 0,75 : on veut le recharger en 6 heures. Sachant que les tensions moyennes sont 2,1 V pendant la charge et 1,9 V pendant la décharge, on demande l'intensité nécessaire à la charge.*

**Solution**

Pendant la décharge, l'énergie utilisable est :

$$W_d = Q_d\, U_d = 150 \times 1{,}9 = 285 \text{ Wh.}$$

Pour la charge, cet élément nécessite une énergie :

$$W_c = \frac{W_d}{\eta_w} = \frac{285}{0{,}75} = 380 \text{ Wh.}$$

Cette énergie $W_c$ est transportée sous une tension $U_c = 2{,}1$ V par la quantité d'électricité :

$$Q_c = \frac{W_c}{U_c} = \frac{380}{2{,}1} = 181 \text{ Ah.}$$

L'intensité nécessaire à la charge doit être :

$$I_c = \frac{Q_c}{t_c} = \frac{181}{6} \approx 30 \text{ A.}$$

## PROBLÈMES DE LA LEÇON XIV

**1.** On dispose de plusieurs piles identiques, chacune de force électromotrice $e = 1{,}5$ volt et de résistance interne $r = 1$ ohm, et d'une résistance $R$ qui absorbe normalement un courant $I = 0{,}7$ ampère sous une tension $U = 1{,}4$ volt.

1° Quelle est la valeur de la résistance $R$ en régime normal ?

2° Combien de piles faut-il associer en parallèle pour faire passer 0,7 ampère dans la résistance ?

3° Si ces piles étaient montées en série, quelle serait la force électromotrice $E$ résultante? Quelle serait l'intensité $I'$ dans $R$ en admettant que sa valeur reste pratiquement la même qu'en régime normal?

**Réponses : 1° $R = 2\ \Omega$ ; 2° $n = 7$ ; 3° $E = 10{,}5$ V ; $I' = 1{,}17 \approx 1{,}2$ A.**

**2.** Un circuit comprend une pile en série avec une résistance variable, un ampèremètre et un interrupteur. Un voltmètre est placé en dérivation aux bornes de la pile.

1° On a relevé les valeurs suivantes en fermant le circuit seulement pendant la durée des lectures :

| $I$ (A) | 0 | 0,39 | 0,66 | 1,4 | 2,1 | 3,6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $U$ (V) | 4,6 | 4,20 | 3,88 | 3,12 | 2,43 | 0,6 |

Tracer la caractéristique en charge ; en déduire l'intensité de court-circuit $I_{cc}$ et la résistance interne de la pile.

2° En faisant débiter la pile sur une ampoule de lampe de poche marquée 3,5 V-0,2 A, on trouve effectivement ces deux valeurs.
Expliquer pourquoi ce point de fonctionnement n'est pas sur la caractéristique relevée au 1°.

**Réponses : 1° $E = 4{,}6$ V ; $I_{cc} \approx 4{,}2$ A ; $r = 1{,}1\ \Omega$. 2° Polarisation.**

**3.** On considère les deux circuits (*a*) et (*b*) :

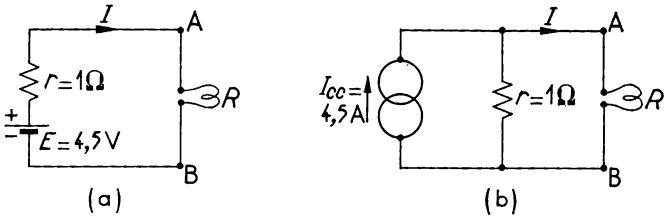



FIG. Pb 3.

(*a*) : Générateur de tension constante $E$ en série avec sa résistance interne $r$.

(*b*) : Générateur de courant constant $I_{cc} = \frac{E}{r}$ en parallèle avec sa résistance interne $r$.

$R$ est la résistance électrique du filament d'une lampe : $R = 19\ \Omega$.

Calculer dans les deux cas :

*a*) Le courant $I$ à travers la lampe.

*b*) La tension $U$ à ses bornes A et B.

**Réponses : a) $I = 0{,}225$ A ; b) $U = 4{,}275 \approx 4{,}3$ volts.**

*Un générateur de tension de f. é. m.* E, *de résistance interne* r *en série, est équivalent, pour la charge, à un générateur de courant* $I_{cc} = \frac{E}{r}$, *en parallèle avec* r (théorème de NORTON).

**4.** Une batterie d'accumulateurs de 6 volts alimente en parallèle 2 lampes de 12 watts et une lampe de 3 watts.

*a*) Quelle est l'intensité du courant débité par la batterie lorsque les 3 lampes sont allumées ?

*b*) La capacité de cette batterie étant de 60 ampères-heures, calculer sa durée de fonctionnement à ce régime.

*c*) Le rendement en quantité de cette batterie étant de 80 %, on demande combien de temps il faudra pour la recharger sous un régime de 9 ampères.

*(C. A. P.)*

**Réponses : a) $I = 4{,}5$ A ; b) $t = 13$ h 20 mn ; c) $t' = 8$ h 20 mn.**

**5.** Une batterie d'accumulateurs au plomb, ayant une résistance interne de 0,15 ohm, est composée de 30 éléments en série.

Cette batterie est mise en charge à l'aide d'un chargeur produisant 75 volts de différence de potentiel, quelle que soit la charge. Calculer :

1° Les valeurs extrêmes de la force électromotrice de la batterie quand la force électromotrice d'un élément passe de 1,8 volt à 2,3 volts pendant la charge.

2° Les valeurs extrêmes de la résistance du rhéostat limitant le courant de charge à 40 ampères.

3° La section du fil résistant du rhéostat si nous pouvons y admettre une densité de courant $J = 8$ ampères par millimètre carré.

4° La longueur de fil résistant correspondant à la plus grande valeur de la résistance du rhéostat (résistivité : 0,8 $\Omega.\text{mm}^2/\text{m}$).

5° La capacité de la batterie, si l'intensité de 40 ampères charge cette batterie en 15 heures et si son rendement en quantité est de 90 %.

*(C. A. P. électrotechnique, 1960.)*

**Réponses : 1° 54 V, 69 V ; 2° $0 < R_h < 0{,}375\ \Omega$ ; 3° $s = 5\ \text{mm}^2$ ; 4° $l \approx 2{,}34$ m ; 5° $Q = 540$ Ah.**

# LECTURE TECHNIQUE

## Autres types de générateurs à courant continu

Trois autres types de *générateurs à courant continu* acquièrent une importance grandissante dans les techniques modernes :

— **Les piles à gaz.**

Les premiers vols de satellites ont mis en vedette un nouveau type de pile dont le principe, connu pourtant depuis longtemps, n'était pas exploité car les difficultés technologiques de réalisation n'avaient pas jusqu'ici été résolues. Aujourd'hui les applications industrielles sont devenues possibles.

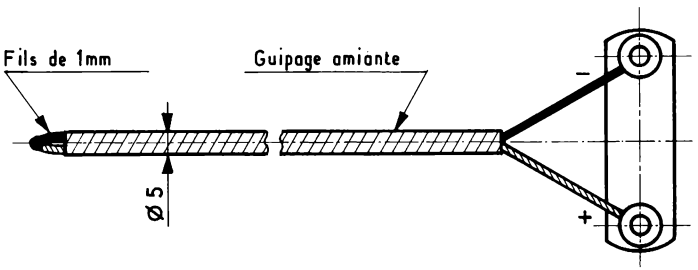
La *pile à hydrogène et oxygène* réalise la synthèse de l'eau à partir de ses éléments constituants. L'énergie chimique du système hydrogène-oxygène est transformée *directement* en énergie électrique. C'est une pile à gaz, encore appelée *pile à combustible.*

— **Les piles thermoélectriques.**

La dissymétrie de la nature des électrodes indispensable à l'apparition d'une force électromotrice, comme c'était le cas dans les piles usuelles et les accumulateurs, est ici remplacée par une dissymétrie due à une *différence de température* entre deux soudures d'une chaîne de conducteurs métalliques.

Les métaux servent seulement à réaliser des thermo-couples pour la mesure des températures.

Par contre, les semi-conducteurs (silicium...) permettent la réalisation de piles thermoélectriques — ou thermopiles — qui produisent de l'*énergie électrique* à partir de l'énergie calorifique provenant du rayonnement solaire ou de combustions.




**Thermo-couple Fer** (—) **- Constantan** (+). — Système constitué par deux conducteurs metalliques de natures différentes, soudés ensemble à une extrémité et fournissant une f. é. m. qui dépend de la température de cette extrémité.

*(Document Chauvin-Arnoux.)*

— **Les batteries solaires au silicium** (*Voir* fasc.IV, p. 143).

LES ÉDITIONS FOUCHER
128, rue de Rivoli — Paris (1er)
N° 3842-177.

Imprimé en France.

LA NÉOGRAVURE (Crété, Desfossés), PARIS
75250-12-76
Dépôt légal : 2e trimestre 1969.

FOUCHER
le livre au
service du métier